



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# LEHKÉ MALTY S OBSAHEM ALTERNATIVNÍCH SUROVIN ODOLNÉ PŮSOBENÍ NEPŘÍZNIVÝCH VLIVŮ

LIGHTWEIGHT MORTARS WITH CONTENT OF ALTERNATIVE RAW MATERIALS AND  
RESISTANT TO ADVERSE EFFECTS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristýna Morkusová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Kristýna Morkusová
<b>Název</b>	Lehké malty s obsahem alternativních surovin odolné působení nepříznivých vlivů
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Brandt, A. M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance, Second Edition, Taylor & Francis Group, 2009.

Page, Ch. L., Page, M. M. Durability of Concrete and Cement Composites, 1st Ed., Elsevier, 2007.

Yuan, G., Li, Q. The use of surface coating in enhancing the mechanical properties and durability of concrete exposed to elevated temperature, Construction and Building Materials, 95, 2015.

Jang, J.G., Kim, H.J., Kim, H. K., Lee, H. K. Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration, Materials & Design, 93, 2016.

Maes, M., De Belie, N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate, Cement and Concrete Composites, 53, 2014.

Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., Junco, C., Gutiérrez-González, S., Calderón, V. Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars, Materials & Design, 97, 2016.

Aydin, S. Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice, Fire Safety Journal, 43, 2008.

Relevantní technické normy

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Kompozitní materiály, zahrnující i mimo jiné lehké malty na bázi silikátové matrice, jsou poměrně rozšířeným materiálem, který nalézá ve stavebnictví široké uplatnění. Při vhodné optimalizaci složení by bylo možné u těchto malt docílit výrazného zlepšení odolnosti vůči nepříznivým vlivům zahrnujícím jak vysoké teploty, tak nejrůznější agresivní prostředí. Současně je vzhledem k environmentální situaci nasnadě i možnost aplikace nejrůznějších surovin z alternativních zdrojů. Diplomová práce se tedy bude zabývat návrhem složení a dále analyzováním parametrů lehkých malt na bázi silikátové matrice a pórovitého kameniva. Důraz bude kladen na využití vysokého podílu alternativních surovin. Na vyvinutých maltách bude sledován zejména vliv synergického působení různých nepříznivých podmínek – mráz, chloridy, příp. další v kombinaci s extrémními teplotami. Nejprve bude třeba se zaměřit na průzkum v teoretické rovině, tj. formou studia aktuálních poznatků relevantních s danou problematikou. Pozornost bude třeba směřovat na vliv různých typů matric, plniv i případně rozptýlené výztuže na vlastnosti a mikrostrukturu hmot vč. vlivu působení nejrůznějších nepříznivých vlivů zahrnujících i chemicky agresivní prostředí.

V návaznosti na získané poznatky a jejich zhodnocení bude vyvinuto několik typů receptur, které budou experimentálně ověřeny. Následně po jejich případné optimalizaci budou malty podrobeny působení nepříznivého prostředí (min. 100 cyklů či 60 dní) a dále i teplotní expozici (předpokládá se cca do 1200 °C). Hodnocení vlivu daného prostředí vč. extrémní teploty bude realizováno s využitím základních fyzikálně-mechanických zkoušek, které budou u vybraných receptur doplněny o fyzikálně-chemické (objemová hmotnost, pevnostní charakteristiky atd.) a mikrostrukturní metody (SEM a příp. CT). V závěru bude formulována optimální receptura či receptury s případnými doporučeními pro navazující výzkum.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem a následným vývojem lehkých cementových malt s obsahem alternativních surovin. Pozornost byla zaměřena na studium působení extrémních vlivů, jako je vysoká teplota (až 1200 °C), mráz a agresivní oxid siřičitý. Ověření odolnosti vyvinutých malt probíhalo s využitím fyzikálně-mechanických zkoušek (objemová hmotnost a pevnost), fyzikálně-chemických metod (počítačová tomografie) a rastrovací elektronové mikroskopie. Posouzení trvanlivosti probíhalo v delším časovém horizontu (90 dní).

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

lehká malta, alternativní suroviny, lehké kamenivo, keramzit, agloporit, vysokopeční struska, škvára, vysoká teplota, mráz, oxid siřičitý

## **ABSTRACT**

This diploma thesis describes research and following development of lightweight cement mortars with alternative raw materials. Attention was focused on study of the effects of extreme influences such as high temperature (up to 1200 °C), freeze-thaw and aggressive sulfur dioxide. Verification of durability of developed mortars was realized using physical and mechanical tests (density and strength), physical and chemical methods (computed tomography) and scanning electron microscopy. Assessment of durability was realized in a longer period of time (90 days).

## **KEYWORDS**

lightweight mortar, alternative raw materials, lightweight aggregates, ceramsite, agloporite, blast furnace slag, slag, high temperature, freeze-thaw, sulfur dioxide

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Kristýna Morkusová *Lehké malty s obsahem alternativních surovin odolné působení nepříznivých vlivů*. Brno, 2018. 140 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2018

---

Bc. Kristýna Morkusová  
autor práce

*Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu své diplomové práce, panu doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. Dále bych zde chtěla vyjádřit velký dík panu Ing. Tomáši Melicharovi, Ph.D. za pomoc při zpracování jak teoretické tak praktické části diplomové práce, centru AdMaS za poskytnutí potřebných zařízení, paní Ing. Šárce Keprdové, Ph.D. a paní Blance Bártové za pomoc při provádění výzkumu.*



# Obsah

A	Úvod.....	12
B	Cíl práce.....	13
C	Teoretická část.....	14
1	Vysoké teploty.....	15
1.1	Změny struktury působením vysokých teplot.....	15
1.2	Vlastnosti ovlivňující chování materiálů za zvýšených teplot.....	18
1.2.1	Pórovitost.....	18
1.2.2	Objemová hmotnost.....	19
1.2.3	Tepelné vlastnosti.....	20
1.3	Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti malt.....	21
1.4	Vliv surovin na chování v prostředí extrémních teplot.....	23
2	Mrazuvzdornost.....	25
2.1	Působení mrazu na materiál.....	25
2.2	Činitelé ovlivňující mrazuvzdornost.....	27
2.3	Mrazuvzdornost lehkých kompozitů na bázi cementu.....	32
3	Agresivní prostředí.....	34
3.1	Působení agresivního plynného prostředí.....	34
3.1.1	Oxid uhličitý CO <sub>2</sub> .....	35
3.1.2	Oxid siřičitý SO <sub>2</sub> .....	40
D	Experimentální část.....	52
4	Metodika experimentální práce.....	52
5	Zkušební metody.....	56
5.1	Stanovení sypané hmotnosti volně sypaného kameniva.....	56
5.2	Stanovení objemové hmotnosti kameniva.....	57
5.3	Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor.....	58
5.4	Sledování změn v průběhu zahřívání – Pozorovací pec.....	58
5.5	Stanovení konzistence čerstvé malty za použití střešacího stolku.....	59
5.6	Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty.....	61
5.7	Teplotní expozice.....	62
5.8	Vystavení agresivnímu plynu SO <sub>2</sub> .....	64
5.9	Mrazuvzdornost.....	65
5.10	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé lehké malty.....	66

5.11	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.....	67
5.12	Nedestruktivní posouzení struktury - CT .....	68
5.13	Analýza mikrostruktury - SEM .....	69
6	Použité suroviny .....	71
6.1	Pojivo.....	71
6.1.1	Cement .....	71
6.1.2	Vysokopeční struska .....	71
6.1.3	Škvára Oslavany.....	72
6.2	Mikrosilika .....	75
6.3	Plnivo - kamenivo.....	75
6.3.1	Liapor (keramzit) .....	75
6.3.2	Popílkový agloporit.....	77
6.4	Celulózová vlákna .....	81
6.5	Polymerní přísada.....	81
6.6	Plastifikační přísada.....	82
6.7	Záměsová voda .....	82
7	Sestavení receptur .....	83
7.1	Vliv kameniva .....	83
7.2	Vliv příměsí .....	84
7.3	Vliv přísad .....	85
7.4	Optimalizované receptury .....	86
8	Příprava zkušebních těles.....	87
8.1	Výroba zkušebních těles.....	87
8.2	Návrh podmínek pro působení agresivního plynu SO <sub>2</sub> .....	89
8.3	Návrh zmrazovacích cyklů .....	89
8.4	Návrh teplotních expozičních podmínek.....	90
9	Výsledky a vyhodnocení.....	91
9.1	Vývoj vlastností v čase.....	91
9.1.1	Objemová hmotnost .....	91
9.1.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	92
9.1.3	Pevnost v tlaku .....	93
9.2	Vliv působení agresivního plynu a mrazu .....	94
9.2.1	Vizuální posouzení u vzorků vystavených působení SO <sub>2</sub> .....	94
9.2.2	Objemová hmotnost .....	97

9.2.3	Pevnost v tahu za ohybu.....	98
9.2.4	Pevnost v tlaku .....	99
9.3	Teplotní expozice malt .....	101
9.3.1	Vizuální posouzení.....	101
9.3.2	Objemová hmotnost a objemové změny .....	104
9.3.3	Pevnost v tahu za ohybu.....	107
9.3.4	Pevnost v tlaku .....	110
9.4	Posouzení vnitřní struktury pomocí CT .....	113
9.5	Analýza mikrostruktury s využitím SEM.....	117
10	Diskuze výsledků.....	121
E	Závěr .....	125
F	Použitá literatura .....	127
G	Seznam obrázků.....	135
H	Seznam tabulek .....	137
I	Seznam grafů .....	138
J	Použité symboly a zkratky .....	139

## A Úvod

Na stavební materiály zabudované do konstrukce působí mnoho faktorů, které značně ovlivňují jejich vlastnosti. Působením nežádoucích vlivů na materiál vznikají nejrůznější procesy vedoucí ke snížení celkové životnosti konstrukce. Proto je při jejich navrhování důležité věnovat pozornost nejen výslednému kompozitu, ale i každé složce separátně a sledovat jejich chování v extrémních podmínkách. Negativní vlastnost jediné složky může ohrozit celkovou odolnost systému.

Jedním z faktorů, které mohou negativně ovlivnit vlastnosti stavebního materiálu je například vznik a působení požáru. Požární odolnost stavebního materiálu je významná z hlediska únosnosti konstrukce, v němž je materiál zabudovaný. Únosnost stavební konstrukce je důležitá v ohledu výdrže po dobu, kdy je zajištěna bezpečná evakuace osob a zvířat a příjezd integrovaného záchranného systému.

Dalšími z činitelů, které mohou výrazně přispět ke snížení životnosti konstrukce, jsou například mráz a agresivní prostředí.

Při navrhování stavebního materiálu je v současnosti kladen důraz na vysokou odolnost, nízké náklady při jeho výrobě a na využitelnost alternativních surovin. Alternativními surovinami se rozumí upravené odpady, druhotné suroviny, vedlejší produkty hutnické, papírenské nebo energetické výroby aj. Použitím surovin z alternativních zdrojů lze docílit nejen nízké ceny, ale také přispět ke zlepšení životního prostředí.

Většina výzkumů se zabývá odolností betonů v agresivním prostředí, avšak výzkumů týkající se lehkých malt, které se mohou uplatnit např. jako správkové hmoty železobetonových konstrukcí, mnoho na českém trhu není. Toto byl jeden z důvodů, proč se tato diplomová práce zabývá právě optimalizací složení lehkých malt odolných v extrémních podmínkách za použití alternativních surovin. Rovněž výzkumy zaměřené na synergické působení více nepříznivých prostředí současně či bezprostředně následně po sobě nejsou realizovány ve velké míře. Přitom se z hlediska působení běžných klimatických podmínek (mráz, siřičitany, uhličitany aj.) s případnými nahodilými situacemi, vznik požáru, jedná o poměrně aktuální téma.

## **B Cíl práce**

Cílem této diplomové práce byl návrh a výzkum složení lehkých cementových malt s vysokým obsahem alternativních složek odolných vůči extrémním podmínkám.

V rámci teoretické části byla práce zaměřena na studium teoretických poznatků a dřívějších výzkumů v oblasti lehkých kompozitních systémů, které odolávají agresivním podmínkám. Nejdříve bylo nutné pochopit veškeré fyzikální, chemické a fyzikálně-mechanické reakce, které probíhají v daném materiálu při působení vysoké teploty, mrazu či agresivního plynu oxidu siřičitého  $\text{SO}_2$ .

Praktická část zahrnovala výběr vhodných složek kompozitu, zkoumání jejich jednotlivých parametrů a na základě těchto vlastností sestavení optimalizovaných receptur. Při návrhu konečných receptur byl kladen důraz na využití co nejvyššího množství alternativních surovin, které mohou výrazně snížit náklady na výrobu malty a současně zlepšit některé vlastnosti (odolnost vůči extrémním teplotám apod.). Použitím alternativních surovin lze snížit produkci emisí při výrobě cementu. Při výběru vhodných alternativních surovin či výrobků na jejich bázi bylo nutné zohlednit aktuální dostupné studie, tedy poznatky a zjištění zejména zahraničního výzkumu se záměrem zlepšení výsledné trvanlivosti malty. Záměrem experimentální části bylo mimo jiné posouzení míry odolnosti jednotlivých receptur v souladu s platnými metodami a postupy či v případě jejich absence sestavením a ověřením nových. Pro pochopení souvislostí fyzikálně-mechanických vlastností, struktury a mikrostrukturních změn bylo třeba využít vhodně zvolené kombinace metod zahrnujících mimo jiné počítačovou tomografii umožňující nedestruktivní analýzu třídimenzionální struktury.

Dílčím cílem diplomové práce bylo rovněž shrnutí a podrobné vyhodnocení veškerých výsledků s vyvozením závěrů, jež zahrnují i doporučení pro vhodný navazující výzkum, jež by danou problematiku mohl dále prohloubit či posunout do jiné roviny.

## C Teoretická část

Pro posouzení kvality kompozitního systému je předně rozhodující jeho složení. Kompozit je složen z několika fází a každá tato fáze má určitý podíl na celkové trvanlivosti a kvalitě systému. Kompozitní systém je tedy konkrétně ovlivněn těmito činiteli [1]:

- charakterem jednotlivých fází, do kterých lze zahrnout i kapalnou a plynou fázi obsaženou v pórech (charakterem fází se rozumí především mechanické vlastnosti - pevnost, mezní přetvoření, modul pružnosti, diagram přetvoření) a anizotropie vlastností fází;
- objemovým zastoupením fází, geometrický tvar fází, geometrické uspořádání fází v systému. Do této skupiny jsou zahrnuty i póry, u kterých se sleduje jejich množství, orientace, velikost a vzdálenost od dispergované fáze.
- interakce jednotlivých fází, charakter jejich styku, soudržnost, schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic;
- historie materiálu, celkového systému a fází, z nichž je kompozit tvořen. Do této kategorie spadá vliv času, technologie zpracování (návrh, kvalita materiálu, provedení), nevhodné užívání, rychlost změn vnějšího namáhání a okolních podmínek.
- vnější činitele a interakce kompozitního systému s okolním prostředím.

Vnější činitele, působící na stavební materiál lze specifikovat prostředím, v němž se daný kompozit nachází. Podle charakteru účinku na materiál, lze tyto činitele rozdělit do 4 kategorií [2]:

- mechanické – do této kategorie lze zařadit statické a dynamické namáhání;
- fyzikální – sem spadají změny teploty a vlhkosti, vysoké teploty, požár, mraz, elektrický proud, záření;
- chemické – vlivy způsobené kapalným či plynným prostředím;
- biologické – ty se mohou dále dělit na mikroskopické a makroskopické.

Výše uvedené vlivy mohou v materiálu vyvolat různé druhy procesů, které mohou vést ke vzniku poruch a tudíž k degradaci materiálu. Procesy, které jsou schopné pracovat samostatně nebo ve vzájemné synergii, mohou mít následující charakter:

- fyzikálně-mechanický;

- fyzikálně-chemický;
- biologický.

## 1 Vysoké teploty

Kompozit na bázi cementu je sice zařazen mezi nehořlavý materiál, ale je dosti ovlivňován zvýšenými teplotami při požáru. Ve struktuře materiálu může docházet jak trvalým tak dočasným změnám, které ovšem závisí na fyzikálně-mechanických vlastnostech kompozitu. Působení vysokých teplot, požáru, má za následek postupné zhoršení kvality kompozitu. To dále vede ke zhroucení struktury cementového tmelu a tudíž ke ztrátě stability a nosnosti.

Pro udržení stability je zásadní pevnost a trvanlivost kompozitu. Podstatné je také sledování jejich změny po dobu trvání požáru a při prudkém ochlazení, způsobené hašením. Jak bude později vysvětleno, nejpodstatnější je sledování změn při teplotách od 300 °C do 1000 °C, případně do 1300 °C, u kterých je také směrodatná výdrž. Při působení vysokých teplot lze očekávat snížení pevnosti vlivem chemických změn v cementovém tmelu. Míra probíhajících změn ovšem závisí na složení daného kompozitu. [3]

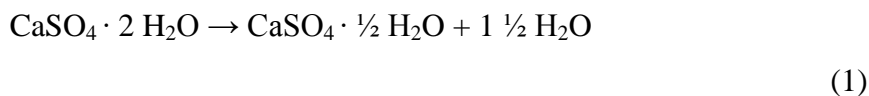
V některých studiích se uvádí, že cementový výrobek vystaven požáru může mít schopnost rehydratace a znovuvytvoření CSH (kalcium hydrosilikátových) útvarů, za předpokladu přítomné vlhkosti a vhodného složení kompozitu, tedy obsahu volného oxidu vápenatého CaO. [4]

### 1.1 Změny struktury působením vysokých teplot

Při působení vysokých teplot na cementové kompozity dochází uvnitř struktury k fyzikálním, mechanickým a chemickým procesům. Jednotlivé procesy probíhající při daných teplotách jsou následující [3] [5]:

- *teploty < 100 °C*: Při těchto nižších teplotách dochází ke ztrátě hmotnosti kompozitu, což je způsobené odpařením volné a částečně fyzikálně vázané vody nacházející se v cementovém tmelu a kamenivu.
- *100 - 200 °C*: Ztráta hmotnosti pokračuje a zároveň začíná působit napětí v mikropórech, které vzniká v důsledku odpařování vody. V rozmezí 150 – 170 °C se dehydratuje sádrovec  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  dle rovnice (1) na hemihydrát síranu

vápenatého, jehož rozklad pokračuje při teplotách  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  na konečný anhydrit  $\text{CaSO}_4$ .



Při  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází k počátku dehydratace cementového gelu.

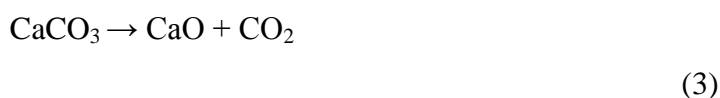
- $200 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Ztráta hmotnosti stále vzrůstá a to především kvůli odpařování vody z gelových pórů. Nastává tzv. první stupeň dehydratace a rozpad tobermoritového gelu, pokud se jedná o autoklávovaný kompozit. V rozmezí teplot  $400 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  se začíná uvolňovat chemicky vázaná voda, která narušuje strukturu kompozitu. Toto porušení lze eliminovat pomocí rozptýlených vláken.

Dále se narušuje soudržnost kameniva a cementové pasty v důsledku rozdílné teplotní roztažnosti. Při teplotách nad  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází k rozkladu CSH (kalcium hydrosilikátových) fází a při teplotách nad  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  k rozkladu minerálu portlanditu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , který se disociuje na oxid vápenatý  $\text{CaO}$  a na vodu - viz následující chemická rovnice.



Kvůli jednotlivým rozkladům a vzniklým poruchám struktury se zvyšuje poréznost systému a snižuje celková pevnost a modul pružnosti.

- $500 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Rychlost úbytku hmotnosti se stále zvyšuje kvůli rozpadu hydroxidu vápenatého a CSH gelu v cementové pastě. Tyto procesy jsou následované tvorbou  $\beta - \text{C}_2\text{S}$  (beta-belitu, dikalciumsilikátu). Při teplotě  $573\text{ }^{\circ}\text{C}$  nastává rychlá modifikační přeměna z  $\alpha$  - křemene s triklinickou soustavou na  $\beta$  - křemen s hexagonální soustavou. Tato přeměna je doprovázena nárůstem objemu o cca  $5\%$  a tím vznikají tlaky, které mohou porušit systém.
- $700 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ : V tomto teplotním rozmezí nastává dekarbonizace, jejíž průběh je v rovnici (3), uhličitanu vápenatého  $\text{CaCO}_3$ . Kvůli větší spotřebě tepla při rozkladu uhličitanů se nárůst teploty v systému zpomalí.

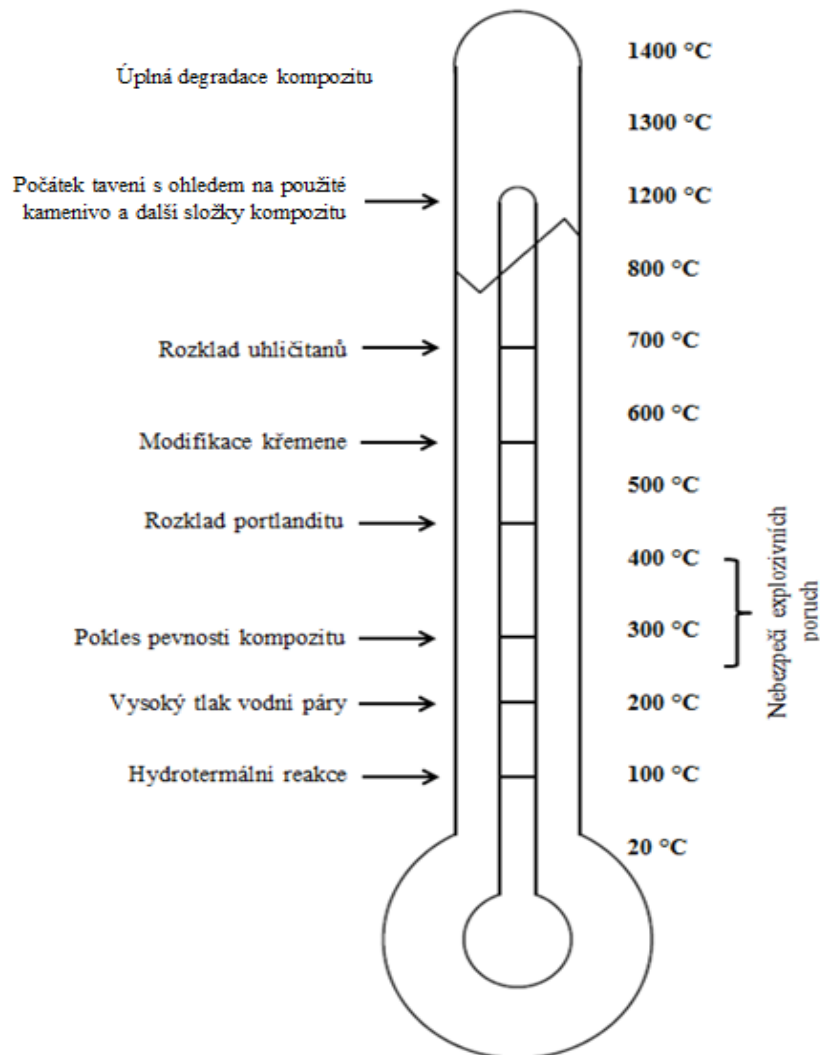




Vniklý plyn rozrušuje strukturu kompozitu. Hydraulické vazby, které se vyskytují v cementovém tmelu, se mění na vazby keramické.

- *Nad 900 °C*: Dochází k roztavení některých složek cementového tmelu a ke vzniku wollastonitu. Při vyšších teplotách klesá hmotnost už velmi málo. Dle druhu kameniva dochází při různě vysokých teplotách také k jeho tavení. Kolem teploty 1270 °C je tmel tvořen vápencovými sloučeninami, složenými převážně z bílého porézního oxidu vápenatého. K úplné degradaci kompozitu na bázi cementu dochází okolo teploty 1300 °C.

Pro přehlednost je na Obrázku 1 vytvořeno schéma, kde jsou vytyčeny nejzásadnější reakce v cementových výrobcích.



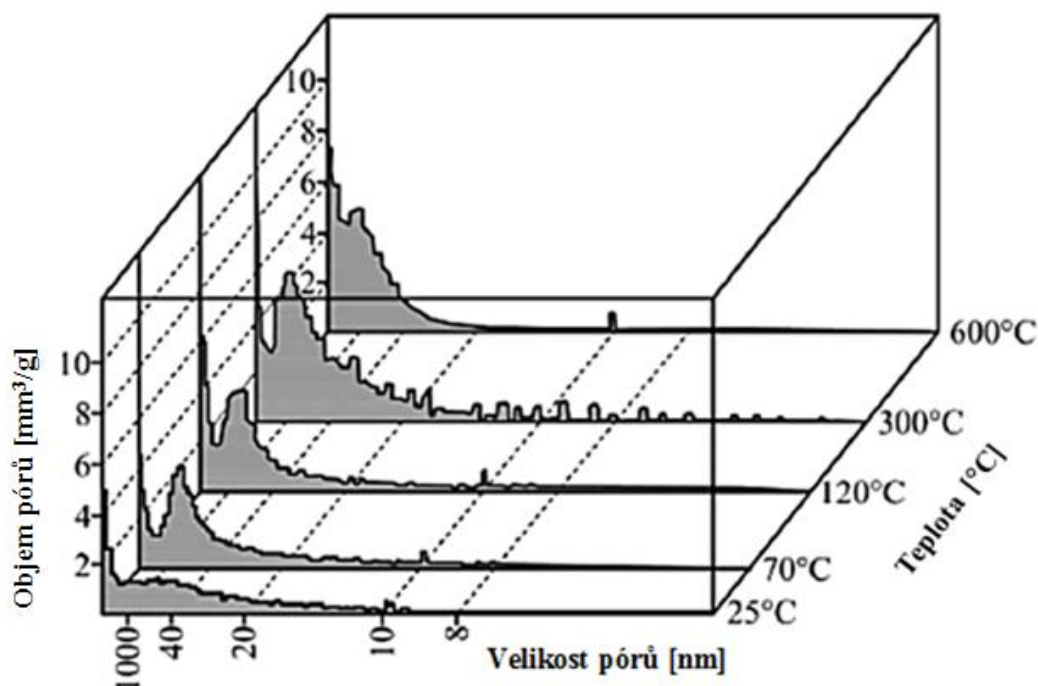
Obrázek 1 - Schéma reakcí probíhajících v kompozitu na cementové bázi při teplotní zátěži [5]

## 1.2 Vlastnosti ovlivňující chování materiálů za zvýšených teplot

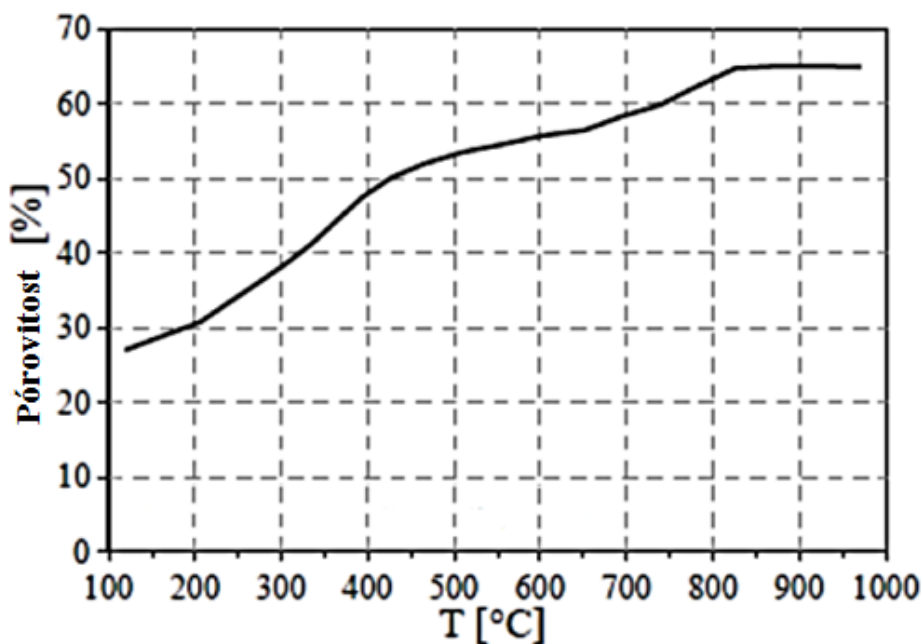
### 1.2.1 Pórovitost

Pokud je kompozit vystaven působení vysokých teplot, pak jeho pórovitá struktura, která je charakterizována celkovým obsahem pórů a jejich rozložením v systému, se bude měnit na základě fyzikálních a chemických reakcí probíhajících při zahřívání. Což bude mít za následek celkovou ztrátu stability kostry kompozitního systému.

Na Obrázku 2 a 3 je znázorněno, že se zvyšující se teplotou nelineárně vzrůstá objem pórů v kompozitu. Růst pórovitosti je do 300 °C poměrně malý vzhledem k výraznému úbytku hmotnosti, vlivem odpařování vody. Nárůst pórovitosti v tomto období není závislý na teplotě, jako spíše na rychlosti vysoušení a dehydratace. Při vyšších teplotách se v důsledku chemických reakcí pórovitost radikálně zvyšuje oproti hmotnosti, která už se výrazně nemění.



Obrázek 2 - Závislost pórovitosti na růstu teploty [6]



Obrázek 3 - Růst pórovitosti v závislosti na teplotě [6]

Nárůst pórovitosti je způsoben zejména dvěma faktory [6]:

- v rozmezí teplot od 20 °C do 250 – 300 °C ztrátou absorbované volné vody a fyzikálně vázané vody;
- při teplotách nad 250 – 300 °C vznikem mikrotrhlinek, v důsledku dehydratace.

Totéž platí i pro propustnost. Je však třeba poznamenat, že zatímco pórovitost se při 400 °C zvyšuje cca o 30 – 100 %, propustnost pouze o 2 % [6].

### 1.2.2 Objemová hmotnost

V důsledku zvyšování objemu pórů v systému, vystaveného vysokým teplotám, se celková objemová hmotnost sníží v závislosti na teplotě. Míra změny objemové hmotnosti je ovlivněna dalšími parametry, jako je teplotní roztažnost, smršťování, difuze vody, uvolňování plynů při dehydrataci, tavení nebo slinování.

Změna objemové hmotnosti ve vysokých teplotách závisí předně na měrné hmotnosti kameniva, na druhu materiálu a na obsahu vlhkosti. Například kamenivo obsahující vyšší množství krystalického SiO<sub>2</sub> (tedy obsahující křemen) se vlivem modifikační přeměny zvětší a tím zvýší pórovitost systému a zároveň způsobí snížení hustoty. Naopak čedičové kamenivo je velmi vhodné kvůli své nízké tepelné roztažnosti [6].

### 1.2.3 Tepelné vlastnosti

Tzv. tepelné vlastnosti kompozitu, jako je tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita, mají zásadní vliv na rozložení teploty uvnitř systému a na výsledné chování za vysokých teplot.

#### *Tepelná vodivost*

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Lze ji popsat jako množství tepla, které projde jednotkou plochy za jednotku času při jednotkovém teplotním rozdílu. Tepelná vodivost systému závisí především na tepelné vodivosti kameniva, které zaujímá až 2/3 objemu. Například použitím hutného kameniva se zvyšuje i celková tepelná vodivost systému. Oproti tomu lehké kamenivo s vysokou pórovitostí vykazuje nižší tepelnou vodivost a tak dokáže snížit vodivost celého systému. To znamená, že u kompozitů obsahujících méně cementového tmelu a více pórovitého kameniva můžeme očekávat velmi nízkou tepelnou vodivost. Kompozity obsahující například pemzu nebo zpěněnou strusku mají nižší tepelnou vodivost o 40 – 50 % oproti kompozitu s hutným kamenivem.

Výslednou tepelnou vodivost neovlivňuje pouze hustota kameniva, ale také struktura cementového tmelu, objem pórů, jejich distribuce a vlhkost, přičemž tepelná vodivost vody je přibližně o 50 % nižší než cementové pasty. Tepelná vodivost je zřídka kdy ovlivněna stářím kompozitu.

Zvyšováním teploty na cca 50 – 60 °C se tepelná vodivost systému mírně zvýší, avšak dalším zvyšováním se v důsledku poruch a zvýšené pórovitosti opět snižuje. Po ochlazení systému na počáteční teplotu, se tepelná vodivost pohybuje pod původní hodnotou tepelné vodivosti. Vše je ale závislé na maximální teplotě, které bylo při ohřívání dosaženo [6].

#### *Měrná tepelná kapacita*

Měrná tepelná kapacita je definována jako množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. Zvýšením vlhkosti zvýšíme také tepelnou kapacitu systému. Výši tepelné kapacity lze ovlivnit mineralogickým složením kameniva a velikostí frakce tohoto kameniva.

S rostoucí teplotou se také zvyšuje specifické teplo. Jeho hodnota je ovšem velice ovlivněna reakčními mechanismy, které probíhají uvnitř kompozitu. Počáteční zvyšování teplot nasyceného betonu sice způsobí nárůst tepelné kapacity, ale to je

především v důsledku odpařování vlhkosti. Lze tedy zkonstatovat, že měrná kapacita se zvyšuje do 500 °C, poté klesá v rozmezí teplot 700 – 900 °C a opětovně vzrůstá nad 900 °C, kdy začíná docházet ke slinutí a tavení [6].

### ***Teplotní roztažnost***

Teplotní roztažnost představuje délkovou (objemovou) změnu při dodání či odebrání tepla. Je definována jako změna délky, která je výsledkem změny teploty o jednotku. Patří mezi jednu z nejdůležitějších vlastností pro posouzení chování materiálu při požáru. Teplotní roztažnost představuje napětí, které může vzniknout v materiálu při zahřívání.

Teplotní roztažnost kompozitu vychází z interakce všech složek systémů, předně kameniva a cementové matrice. Každá z těchto částí je charakterizována různým chováním při požáru. Z tohoto důvodu vzniká největší napětí právě na jejich rozhraní. Odlišná teplotní roztažnost má za následek vznik mikrotrhlin v cementovém tmelu.

Jako řešení se jeví použití pórovitého kameniva, jako jsou expandované jíly, břidlice a strusky, které se vyznačují nízkou teplotní roztažností. Výběrem vhodného lehkého kameniva lze dosáhnout tepelné stability celého systému, což může vést k prevenci vzniku prasklin. Obsah  $\text{SiO}_2$  v kamenivu je také velmi rozhodující. Se snižujícím se obsahem oxidu křemičitého klesá také teplotní roztažnost a rovněž se omezí objemové změny vlivem modifikační změny křemene.

Cementová pasta zvyšuje svůj objem do teplotního rozmezí 150 – 250 °C. Maximálního zvětšení objemu o 0,2 % dosáhne již při teplotě 100 – 150 °C. Dalším zvyšováním teploty nad 300 °C se cementový tmel začne smršťovat, přibližně o 1,6 % až 2,2 % při teplotách 800 °C, v důsledku rozkladu a odpařování chemicky vázané vody.

Z hlediska použitého cementu lze dosáhnout nejmenšího smrštění s portlandským směsným, hlinitanovým a vysokopecním cementem [6].

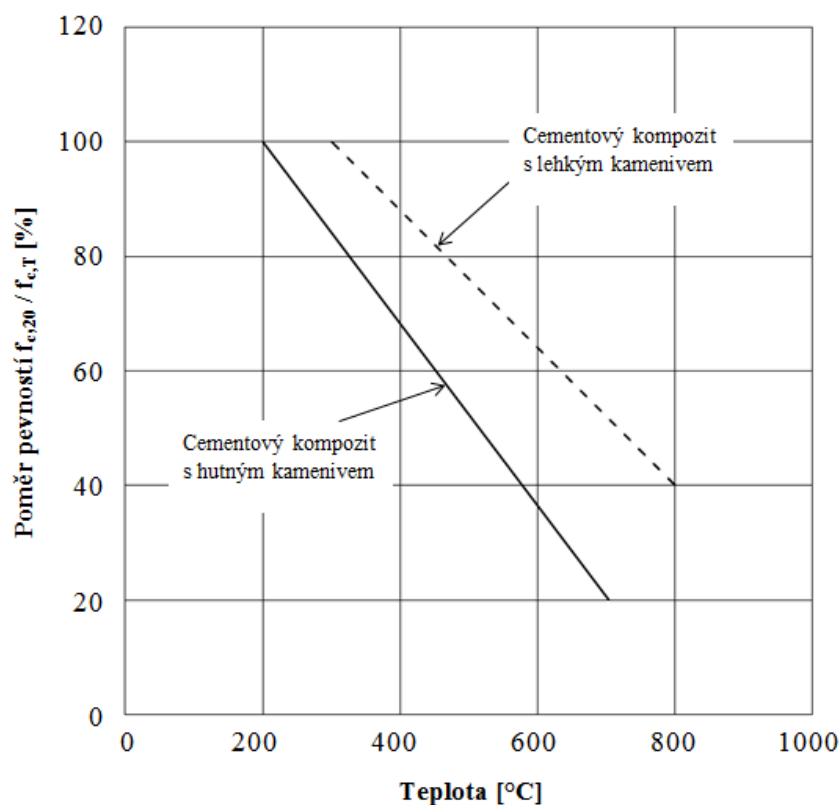
## **1.3 Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti malt**

Výše teploty ovlivňuje nejen pevnost kompozitu ale také jeho další vlastnosti, jako modul pružnosti. Při teplotě 100 °C se začíná ze struktury odpařovat vlhkost a to způsobí mírný nárůst pevností, ovšem i snížení hodnoty modulu pružnosti o 10 – 20 %. Dosáhne-li teplota 300 °C, pak vlivem rozkladu CSH produktů a portlanditu vznikají mikrotrhlinky. Růst pórovitosti systému způsobí pokles soudržnosti mezi kamenivem

a cementovou maticí, což vede ke snížení celkové pevnosti. Při teplotách 400 – 500 °C nastává uvolňování chemicky vázané vody, jejíž vzniklá pára naruší strukturu systému. Vlivem objemových změn, vzniklých při modifikaci křemene, se poruchy dále prohlubují. Pokles pevností a modulu pružnosti pokračuje nadále i při 600 - 900 °C, kdy nastává rozklad uhličitánů. Dalším zvyšováním teploty se mohou pevnosti zvyšovat a to z důvodu slinování a tavení. Teplota tavení závisí na jednotlivých složkách kompozitního systému. Některé výzkumy uvádí, že cementový kompozit vystavený teplotám do 500 °C je schopen získat až 90 % z původní pevnosti.[3]

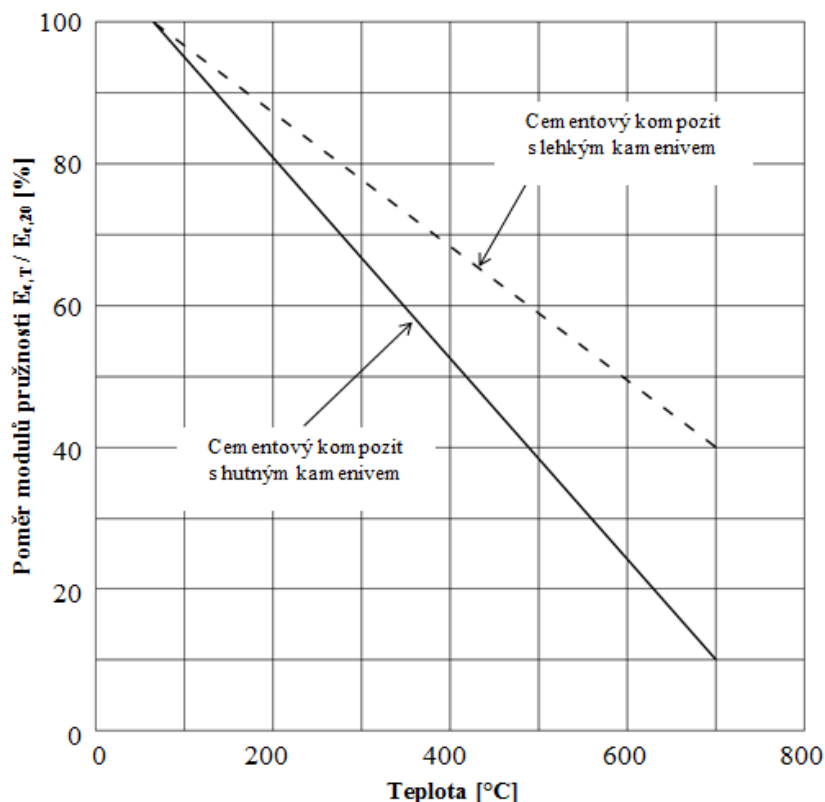
Pro závislost změny pevnosti na teplotě tedy platí, že [3]:

- hmoty obsahující větší množství cementu mají výraznější pokles pevnosti;
- původní pevnost a vodní součinitel mají na vývoj pevnosti v teplotě zanedbatelný vliv;
- poměr cementového tmelu ke kamenivu se výrazně projevuje na ztrátě pevnosti;
- druh kameniva ovlivňuje pokles pevností především v teplotním intervalu 20 – 500 °C;
- ztráta pevnosti u lehkých malt je menší než u těch hutných, což lze zpozorovat na grafu níže (viz Obrázek 4).



Obrázek 4 - Změny pevnosti v závislosti na zvyšující se teplotě [3]

Účinky vysokých teplot mají na modul pružnosti obdobný vliv (viz Obrázek 5). Se zvyšující se teplotou modul pružnosti klesá, ovšem úbytek modulu lze značně ovlivnit použitím pórovitého kameniva.



Obrázek 5 - Změny modulu pružnosti v závislosti na zvyšující se teplotě [3]

#### 1.4 Vliv surovin na chování v prostředí extrémních teplot

Na výdrž cementové malty mají vliv veškeré složky kompozitu a nejen svým složením, ale také strukturou. Rovněž těmito aspekty se již vědci zabývali. Například Aydin [7] v rámci výzkumu sledoval chování lehkých cementových malt, které obsahovaly 20 – 80 % granulované strusky a jako kamenivo pemzu, za vysokých teplot. Zkušební vzorky malt byly vystavené teplotám 20, 300, 600 a 900 °C a poté podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. Pomocí mechanických vlastností bylo zjištěno, že s rostoucím obsahem strusky se míra odolnosti malty zpočátku (při teplotách 300 a 600 °C) nezvyšuje. Znatelný rozdíl je vidět až při nejvyšších teplotách, kdy s rostoucím obsahem strusky rostla i pevnost v tlaku. Z tohoto důvodu je výhodné nejen z ekonomického hlediska, ale i z hlediska trvanlivosti nahradit část cementu, který není ve vysokých teplotách odolný.

V jiných studiích – např. [8] se autoři zabývali lehkými maltami, které obsahovaly vysokopecní strusku, popílek a pórovité kamenivo agloporit, umístěné do náročného teplotního prostředí s teplotami 400, 600, 800 a 1000 °C. Jednoznačně bylo prokázáno, že pórovité kamenivo přispívá k odolnosti vůči vysokým teplotám, protože poskytne dostatečný prostor pro odcházející plyny. Dále bylo zjištěno, že receptury obsahující popílek byly stabilnější ve vyšších teplotách než receptury obsahující strusku. Tato skutečnost byla vysvětlena tak, že popílek se ve směsi choval inertně, tudíž jako plnivo, kdežto struska byla pomocí hydratace zabudována do struktury CSH (kalcium hydrosilikátových) gelů, čímž se mírně snížila její odolnost. Z toho vyplývá, že použitím alternativních surovin nahrazujících cement je možné dosáhnout přinejmenším srovnatelných vlastností a rozhodně lepší odolnosti v nepříznivém prostředí, jako je v tomto případě extrémní teplota.

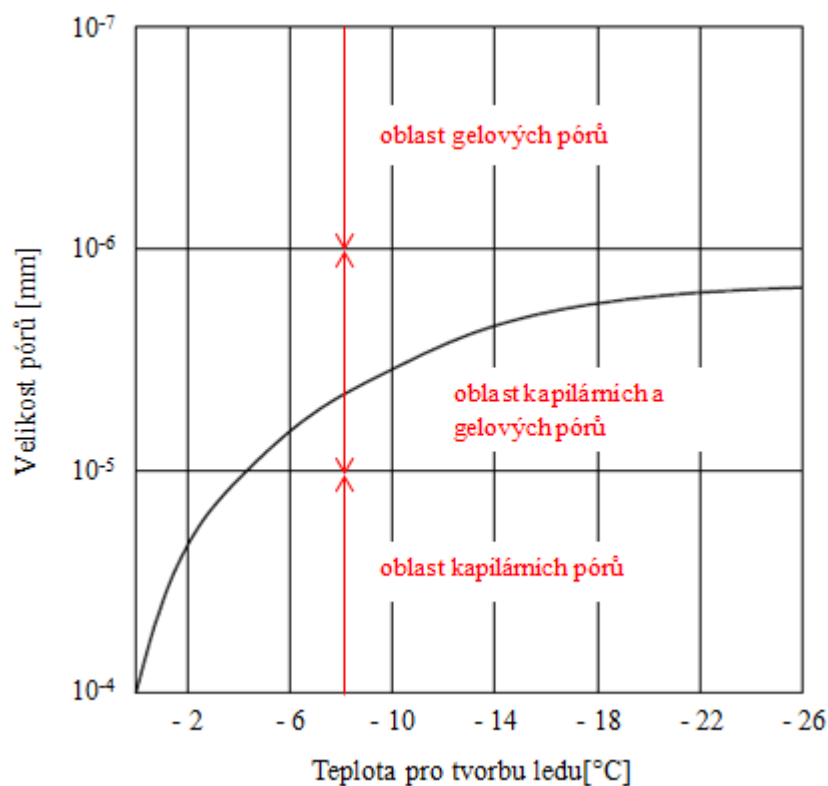


## 2 Mrazuvzdornost

Pod pojmem mrazuvzdornost se rozumí schopnost kompozitu v nasyceném stavu odolávat cyklickému zmrazování a rozmrazování. Mrazuvzdornost je jedna z nejdůležitějších vlastností pro předpokládanou odolnost vůči povětrnostním podmínkám. Zařazuje se z hlediska účinků na materiál k vnějším fyzikálním činitelům.

### 2.1 Působení mrazu na materiál

Nejdůležitější pro pochopení mechanismu při mrazu je sledování chování vody v daném kompozitu. Chemicky vázaná voda, obsažená v materiálu, v led nikdy nepřechází. Gelová voda je schopna se změnit v led, ale při velmi nízkých teplotách, cca při  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$  zamrzá gelová voda úplně. Oproti tomu voda v kapilárách se mění v led již při  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , poněvadž se v kapilárách vyskytuje roztok. Ovšem teplota pro tvorbu ledu v kapilárách je závislá na jejich velikosti (viz Obrázek 6). Teoretické poznatky uvádí, že při snižování teploty se uvnitř kapilár vytvoří ledová tříšť, která se vlivem tlaku tlačí z větších kapilár do menších. [9]



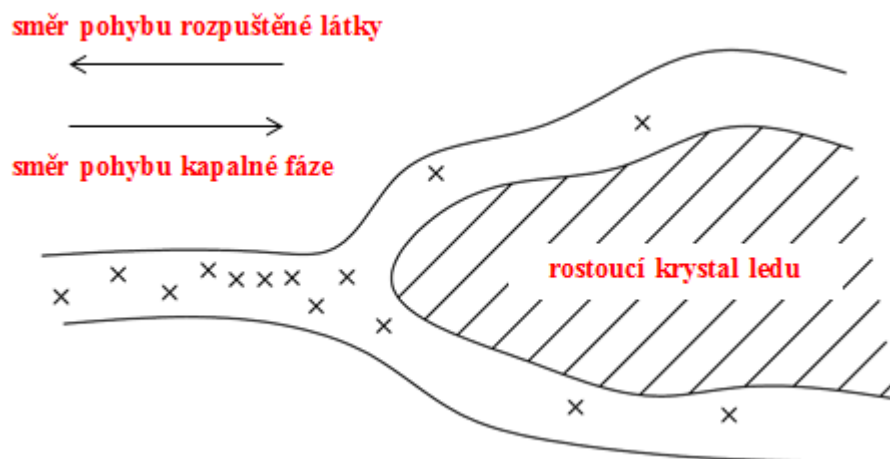
Obrázek 6 - Vztah mezi velikostí pórů a teplotou tvorby ledu [9]

Dalším snižováním teploty se utvoří led, který má o 9 % (1/11) větší objem než voda v kapalně fázi. Vlivem zvětšujícího se objemu vzniká obrovský krystalický tlak, který může nabývat hodnot až 200 MPa. Led se zpočátku vytváří na povrchu materiálu a poté se tlačí do středu kompozitu, čímž způsobuje růst objemu. Rychlost tlaku do jádra kompozitu je ovlivněna rychlostí ochlazování. Po roztání ledu zůstane ve struktuře téměř 1/3 z celkového roztažení. [9]

Kromě přechodu skupenství vody, je třeba sledovat i teplotní roztažnost, která má také značný vliv na strukturu při cyklickém zmrazování. Například teplotní roztažnost betonu je rovna  $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a teplotní roztažnost ledu  $51 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Vlivem rozdílu teplotních roztažností dochází při zvyšování teploty a při tání ledu ke zvyšování hustoty a snižování objemu ledu. [10]

Na základě předchozích tvrzení lze mechanismus zmrazování a rozmrazování nasáklého kompozitu popsat následovně. Před samotným ochlazováním jsou otevřené póry a kapiláry zcela zaplněné vodou. Ochlazováním vzniká v kapilárách led. Teplota tvorby ledu je ovlivněna velikostí kapiláry a póru a koncentrací látek, nejčastěji alkálií a solí, v roztoku, který se v dutinách nachází. Jelikož je led tvořen pouze z čisté vody, zvyšuje tak koncentraci zbývajících kapalně fáze a tím ovlivňuje teplotu tuhnutí. Vzniklý led zvětšuje svůj objem a tlačí zbývajících vodu z kapilár do gelových pórů. Pokud je ochlazování rychlé a propustnost matrice nízká, ledem stlačovaná voda nemá kam uniknout a tím zvyšuje celkové napětí ve struktuře kompozitu. Vyvozené tahové napětí může způsobit poruchy ve formě trhlin, pokud vzniklé napětí překročí pevnost v tahu daného kompozitu. [11] Tento problém lze vyřešit dostatečným provzdušněním kompozitu, a vytvořením tak uzavřených vzduchových pórů definované velikosti  $< 300 \text{ }\mu\text{m}$  s definovaným rozložením v cementové matrici. Tyto póry nejsou zaplněné vodou a slouží jako prostor pro zvětšování objemu ledu. [12]

Během snižování teploty dochází k dalšímu jevu. Vlivem nárůstu ledu v pórech a kapilárách vzniká osmotický tlak, který způsobí difuzi čisté vody směrem ke vznikajícímu ledu. V bezprostřední blízkosti ledu vzniká tuhnutím čisté vody vyšší koncentrace rozpuštěných látek, které mají tendenci vyrovnávat koncentraci směrem od vznikajícího ledu. Tento proces je naznačen na Obrázku 7. K pohybu látek také přispívá teplota, tzv. termoosmóza, při které se nezamrzlá voda snaží vyrovnávat teplotu pohybem směrem k ledu. [10]



Obrázek 7 - Pohyb kapalné fáze při růstu krystalu ledu [11]

Při snížení teploty z 0 °C na – 20 °C se led vlivem teplotní roztažnosti smrští o 0,31 % a vzniklý prostor je vyplněn zbývající kapalinou. Tato kapalina poté mrzne a vyplní celý pór. Při opětovném zvýšení teploty se vlivem teplotní roztažnosti opět zvětší objem ledu, ale pouze o zmíněných 0,31 %. Vzniklý tlak působí na stěny kapiláry prostřednictvím tahového napětí. Tento tlak vyvozený zvětšeným objemem není příliš velký, ale je třeba ho brát v úvahu při cyklickém zatěžování, kdy se může porušení každým cyklem zvětšovat. [10]

## 2.2 Činitelé ovlivňující mrazuvzdornost

### – *Stáří betonu / malty:*

Postupem času, kdy beton nabývá vyšších pevností, získává i vyšší odolnost vůči mrazu. [12]

### – *Kontakt s vodním prostředím a klimatické podmínky:*

Pokud není kompozit nasáklý vodou, pak se při snižování teploty tvoří pouze tepelné dilatace. Pokud je kompozit nasáklý vodou, projeví se snížení teploty pod bod mrazu objemovými změnami, které jsou způsobeny přeměnou skupenství z vody na led, tepelnou dilatací a vzniklým tlakem. [9] Další rozhodujícím faktorem je rychlost a průběh chladících cyklů. Pokud je snižování teploty pozvolné, tlaky se mohou snadněji rozptýlit do matrice a vznikají menší poruchy. Naproti tomu náhlé cyklické zatěžování mrazem je mnohem více pro kompozit destruktivní než větší výdrž při nízkých teplotách. [11]

– ***Pórovitá struktura cementové matrice:***

Nejzásadnější vlastnost ovlivňující mrazuvzdornost. Rozhodující je distribuce pórů zaplněných vodou a jejich velikost. Zamrzání kapilár probíhá při nízkých teplotách od největších k nejmenším. Uzavřené póry, které neobsahují vodu, mrazuvzdornost nijak neovlivňují. [12]

Vysoká pórovitost kompozitu poskytuje dostačující prostor pro expanzi ledu, za předpokladu, že kompozit není plně nasycen vodou. Naopak vysoká nepropustnost hutného betonu je taky výhodou. Díky nízké propustnosti se do betonu nedostane voda z okolního prostředí. Z tohoto důvodu je třeba při návrhu vyvážit poměr mezi vysokou porézností a nízkou propustností. [11]

– ***Koncentrace roztoku v pórovité struktuře:***

Koncentrace roztoku alkálií a solí uvnitř pórovité struktury ovlivňují bod tání, který je se zvyšující se koncentrací nižší. Tato skutečnost je podložena tzv. Raoultovým zákonem, který říká, že: parciální tlak vodní páry nad roztokem je přímo úměrný teplotě tání roztoku.

– ***Pevnost kompozitu:***

Kompozit musí odolávat napětí, které je vyvozeno od zvětšujícího se objemu ledu. Pomocí modulu pružnosti a Hookova zákona lze určit minimální pevnost odpovídající kritické objemové změně. Tuto pevnost stanovil Mac Innis pro beton jako hodnotu  $\geq 33,5$  MPa. [9]

– ***Provzdušnění kompozitu:***

Tradiční zvýšení trvanlivosti je prostřednictvím redukce vodního součinitele. Z hlediska mrazuvzdornosti má poměr vody k cementu také pozitivní vliv. Nízkým vodním součinitel sníží obsah volné vody, která je k dispozici pro tvorbu ledu ve struktuře. Další metodou pro zvýšení mrazuvzdornosti je provzdušnění struktury.

Provzdušněním se rozumí umělé vytvoření uzavřených vzduchových pórů v cementové matrici. Vytvořené póry mají definovanou velikost, která je  $< 300 \mu\text{m}$ , a definované rozložení v matrici. [12] Dané póry vytvoří při zmrazování prostor pro únik stlačené vody a tím sníží celkový vnitřní tlak. Při rozmrazování je voda z pórů opět vtažena do kapilární sítě.

Póry jsou vyrobeny pomocí provzdušňovací přísady, která mimo jiné zvyšuje zpracovatelnost a soudržnost směsi. Zlepšení zpracovatelnosti prostřednictvím

provzdušnění nám může snížit spotřebu vody. Negativním aspektem provzdušnění může být snížení celkové pevnosti, kdy 1 % přivedeného vzduchu do struktury snížíme pevnost o 5,5 %.

Provzdušňovací přísady fungují na principu povrchově aktivních látek, které stabilizují póry při míchání a rovnoměrně je distribuují v cementové matici. [11]

– ***Stupeň nasycení kapilární pórovitostí vodou:***

Tento stupeň se získá poměrem kapilární pórovitosti k celkové. Tato hodnota by měla být  $< 0,8$ . Množství a distribuce kapilárních pórů se s hydratací mění. V důsledku hydratace se také mění minimální potřebné provzdušnění cementového kompozitu. [9]

– ***Složky kompozitu:***

*Kamenivo* – Jelikož kamenivo tvoří až  $\frac{3}{4}$  kompozitu, je velice důležitý pro požadované vlastnosti vhodný výběr kameniva. Pokud má být celý kompozit mrazuvzdorný, musí být mrazuvzdorné i kamenivo.

Z hlediska petrografie je vhodné do mrazuvzdorných kompozitů používat kamenivo na bázi břidlice, fylitu a slepence. Dle normy pro odolnost kameniva mrazu lze obecně zkonstatovat, že kamenivo je mrazuvzdorné pokud jeho nasákavost je  $< 1$  %. Ovšem některé horniny jako jsou vysokopeční strusky, karbonové pískovce a dolomity mají nasákavost až 2 % a i přesto všechno jsou mrazuvzdorné. Tuto vlastnost vykazují i jurské vápence a pískovce, které mají nasákavost  $> 4$  %.

Pokud kamenivo obsahuje jílové částice a prach, je jeho soudržnost s cementovým tmelem značně snížena a tím i mrazuvzdornost. Z hlediska obsahu odplavitelných částic je vhodnější těžký práný písek.

Jako vhodné kamenivo lze považovat i některé vyvřelé a přeměněné horniny, jako je čedič, žula, vápenec a amfibolit, které se vyznačují nízkou pórovitostí. Rozhodují je ale především plynulá křivka zrnitosti, která zaručuje rovnoměrné rozložení frakcí. [10]

Co se týče pórovitosti kameniva, bylo dokázáno, že zrna kameniva obsahující póry o velikosti  $< 5$   $\mu\text{m}$  mají tendenci zůstat téměř nasycené vodou, dokonce i při nízké vlhkosti. Kameniva s menšími velikostmi pórů se charakterizují nižší propustností, čímž vzniká vlivem mrazu vyšší hydraulický tlak. Póry s velikostí

> 5  $\mu\text{m}$  při nízké relativní vlhkosti nezůstávají zaplněny zcela vodou a tím napomáhají k mrazuvzdornosti.

Kromě velikosti pórů v kamenivu má na mrazuvzdornost spíše jejich celkové množství obsažené v kamenivu. Tato vlastnost je vyjádřena svým způsobem výše uvedenou nasákavostí.

Míru pórovitosti kameniva je možno rozdělit do 3 kategorií: nízká pórovitost, střední pórovitost a vysoká pórovitost. Kameniva s nízkou pórovitostí lze obecně považovat za trvanlivé, protože obsah volné vody je nízký. Kameniva se střední pórovitostí jsou nejméně kvalitní, jelikož obsahuje póry plné volné vody, která při působení mrazu nemá kam unikat a utváří tak velké tlaky. Kamenivo s velkou pórovitostí je obecně trvanlivé. U tohoto hrubého pórovitého systému kapalná fáze snadno uniká ven z póru vlivem vysoké propustnosti, a tím se snadno uvolní tlak vzniklý při zamrzání.

Další důležitou vlastností kameniva je velikost částic. Pro dané kamenivo existuje tzv. kritická velikost, nad kterou je vlivem mrazu struktura kameniva ohrožena, jelikož vzdálenost k uvolnění tlaku je pro tok kapaliny příliš velká. Kritické velikosti se dá dosáhnout nadrcením kameniva na frakce, které splňují velikostní požadavky. Vždy je ale důležité kontrolovat ostatní vlastnosti, na které by mohlo mít zdobnění negativní vliv a tím i na výslednou trvanlivost, jak kameniva tak, kompozitu.

Kromě předchozích vlastností je také důležité brát v potaz kvalitu mezifázové struktury mezi maticí a kamenivem. Mezifázová struktura je typicky pórovitější a má tendenci obsahovat více hydroxidu vápenatého než okolní cementová matrice. Zejména propustnost mezifáze je určující pro odolnost vůči mrazu. Díky propustnosti lze bez problému uvolňovat tahové napětí v kamenivu směrem ven. Struktura mezifáze je ovlivněna vodním součinitelem. [11]

*Cement* – Na základě výzkumu Litevské university [3], bylo prokázáno, že jako neodolnější cement v mrazu se jeví vysokopecní cement CEM III/B 32,5 N. Mrazuvzdornost vysokopecního cementu závisí na způsobu výroby a průběhu mletí. Výhodnější je, pomlet složky, jako je struska a slínek, odděleně, jelikož zrna strusky jsou tvrdší a při společném mletí by nebylo dosaženo tak velkého měrného povrchu. Větším měrným povrchem lze dosáhnout mnohem vyšších reakčních rychlostí.

Minimální použité množství cementu pro jednotlivá prostředí je dáno dle normy.

*Vodní součinitel* – Se sníženým vodním součinitelem se zvyšuje, jak už bylo řečeno, hutnost kompozitu a snižuje obsah volné vody, která by mohla při nízkých teplotách zmrznout. Nízkým součinitelem se sníží i permeabilita a tím i nasákavost materiálu.

*Přísady* – Pro dosažení nízkého vodního součinitele při stejné zpracovatelnosti je třeba použít superplastifikační a plastifikační přísady. V rámci správného použití plastifikační přísady je důležité znát její složení a její reakci s daným pojivem (cementem). Některé plastifikační přísady mohou kvůli svému složení cementový tmel provzdušňovat a ovlivnit tak výslednou hutnost. Jiné mohou zase působit jako odpěňovače, proto na to třeba pohlížet při používání kombinace plastifikační a provzdušňovací přísady, aby použití nebylo kontraproduktivní.

Svým způsobem se pro snížení vodního součinitele může použít i provzdušňovací přísada, která svým provzdušněním zlepšuje zpracovatelnost čerstvé směsi a tím sníží potřebný obsah vody. Použitím provzdušňovací přísady dojde k porušení kapilární sítě v cementové matrice, a tím vytvoření dobrých předpokladů pro odolnost vůči mrazu. Z hlediska správného provzdušnění matrice není rozhodující procentuální zastoupení vzduchu v kompozitu, ale spíše velikost pórů a jejich uspořádání ve struktuře.

*Příměsi* – Při hydrataci cementu vzniká minerál portlandit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , díky němuž má cementový kompozit zásaditý charakter. Na trvanlivost při působení agresivního prostředí má spíše negativní vliv, jelikož je vlivem agresivní kapaliny vyluhován a na jeho místě vznikají prostory. Pokud je do směsi kompozitu použita příměs s pucolánovými vlastnostmi, pak tento minerál vlivem pucolánové reakce přechází na CSH (kalcium hydrosilikátový) gel, což přispívá k trvanlivosti.

Například mikrosilika má na trvanlivost velice pozitivní vliv. Nejen, že s ohledem na svůj velký měrný povrch vyplní strukturu kompozitu a zvýší celkovou hutnost a vodotěsnost, ale také vlivem pucolánových vlastností sníží obsah „zranitelného“ portlanditu. [10]

### 2.3 Mrazuvzdornost lehkých kompozitů na bázi cementu

Během posledních let se vývoj a výzkum v oblasti lehkých kompozitů obsahujících co nejvíce alternativním surovin posunul výrazně kupředu. Mnoho vědeckých prací se především zabývalo, jak docílit dobré zpracovatelnosti, nízké objemové hmotnosti a zároveň vysoké pevnosti. Nicméně je toto úsilí často spjato s problémy souvisejícími se strukturou směsi jak v čerstvém tak zatvrdlém stavu, tak s trvanlivostí. Proto je důležité zaměřit se právě na trvanlivost, v tomto případě mrazuvzdornost, a na strukturu kompozitu, která ji značně ovlivňuje.

Kucharczyková a spol. [13] [14] realizovala několik výzkumných prací, v rámci nichž bylo zkoumáno chování betonu vylehčeného pórovitým kamenivem při nízkých teplotách. Autorka zjistila, že velice důležitým faktorem pro trvanlivost betonu je stupeň nasycení pórovitého kameniva vodou před zamícháním do čerstvé směsi. Nedostatečně nasycené kamenivo odebírá při míchání cementu vodu a ten nemůže zcela zreagovat. Lehký kompozit je také velice citlivý na podmínky ošetřování. Nedostatečné ošetření může vést ke tvorbě trhlin a kapilár, které snižují fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu.

V rámci výzkumu Kucharczyková testovala 3 receptury obsahující pórovité kamenivo keramzit (Liapor), které se vyznačovalo různým stupněm nasycení, a to konkrétně: vysušené, s 13% vlhkostí a s 29% vlhkostí. Množství vlhkosti bylo nastavené na základě předchozích zkoušek nasákavosti kameniva., při kterých bylo zjištěno, že Liapor frakce 4 – 8 mm měl po 24 hodinách 21,2% nasycení. Vyrobené vzorky byly umístěny na 7 dní do vodného prostředí a po dosažení 28 denních pevností byla provedena zkouška mrazuvzdornosti, která odpovídala 200 cyklům střídavých teplot od – 20 °C do 20 °C. Výsledek zkoušky mrazuvzdornosti prokázal, že směsi obsahující vysušené kamenivo a kamenivo s 29% vlhkostí se ukázaly jako méně odolné vůči mrazu z hlediska pevnosti v tahu za ohybu. Z výzkumu vyplývá, že pro dosažení dlouhodobé trvanlivosti v mrazu je důležitá, kromě dalších vlastností, optimalizace vlhkosti kameniva před zamícháním do čerstvé směsi. [13] [14] [15]

Předchozí výsledky a zjištění potvrzuje Lee a spol. [16], který sledoval chování pórovitého kameniva na bázi expandované břidlice v lehké maltě při nízkých teplotách. Kamenivo bylo předem uloženo do vody na 0,5 a 24 hodin. Vzhledem k rozdílné době pro nasáknutí vody, byly vyrobeny dvě receptury lehké malty, u kterých byla dle normy ASTM C666 (1997) provedena zkouška mrazuvzdornosti. Jednotlivé cykly trvaly



185 minut při teplotách  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Počet cyklů byl stanoven na 200, 400 a 600. Výsledek studie poukazuje na skutečnost, že nasákavost malty s pórovitým kamenivem je logicky větší než je tomu v případě kameniva hutného, ale přes tuto skutečnost vykazovala lehká malta vyšší mrazuvzdornost, a to konkrétně směs obsahující kamenivo, které bylo uloženo ve vodě po dobu 30 minut. Z čehož lze usoudit, že přiměřeně větší množství vody v kamenivu při míchání má znatelný vliv na výslednou trvanlivost. [16]

Autoři Shi, Qiu a kol. [17] se ve svých pracích zaměřili na zkoumání vlivu objemového zastoupení lehkého kameniva v maltě na celkové vlastnosti po zmrazovacích cyklech. Guan-Yin Shi navrhl pět receptur, které obsahovaly různé množství keramzitu. První referenční sada neobsahovala žádné lehké kamenivo, ve druhé sadě bylo 15 % písku nahrazeno keramzitem, ve třetí 30 % a ve čtvrté 45 %. Každá z těchto sad byla podrobena po 28 dnech testu mrazuvzdornosti, 40 cyklů při teplotách  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ze zjištěných výsledků lze odvodit, že se zvyšujícím se množstvím pórovitého kameniva ve směsi se zvyšuje houževnatost malty v mrazivých podmínkách a také jeho dynamická pevnost v tlaku. Uvedená zjištění tedy poukazují na fakt, že při optimálních výrobních podmínkách může použití pórovitého kameniva značně zlepšit mrazuvzdornost výsledného kompozitního systému. [17]

### 3 Agresivní prostředí

Míra degradace materiálu agresivním prostředím a její rychlost je výrazně ovlivněna průběhem chemické reakce, která je závislá na druhu a koncentraci agresivní látky, a složení kompozitního systému. Dále je určující teplota a vlhkost prostředí. Z hlediska kvality kompozitu je rozhodující pevnost, pórovitost a přítomnost trhlin, protože každá trhlina snižuje svým způsobem trvanlivost.

Klasifikaci agresivního prostředí lze stanovit podle jednoho z těchto kritérií:

- stupeň agresivity prostředí (dle charakteru prostředí);
- stupeň chemické agresivity (dle druhu a koncentrace agresivní látky);
- stupeň klimatických vlivů.

Dle stupně agresivního prostředí lze rozdělit agresivitu na:

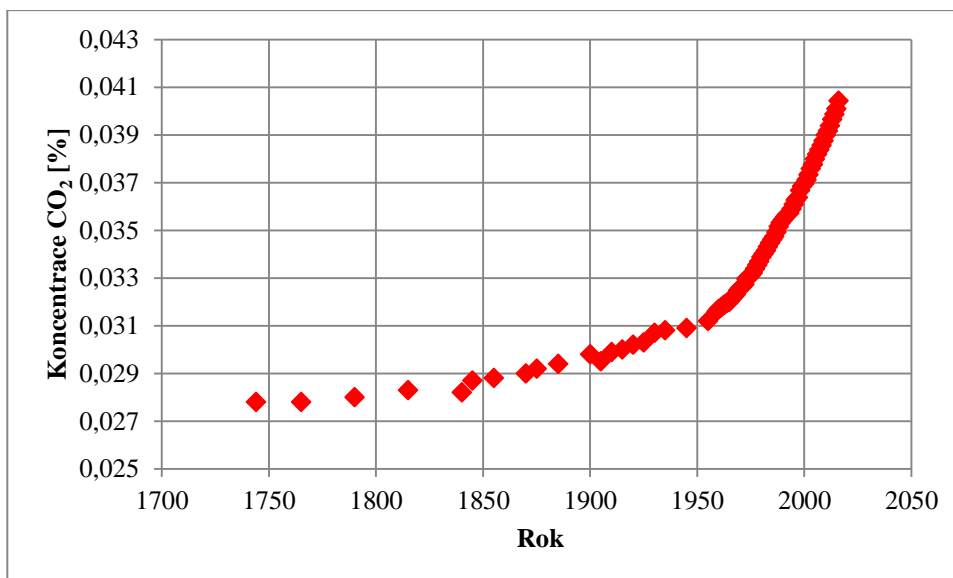
- slabou – krátkodobé působení vlhkosti, vnitřní části domů;
- střední – vnitřní části domu s vysokou relativní vlhkostí, zmrazovací cykly v suchém či mírně vlhkém prostředí;
- silnou – slaná voda, okysličená voda s malým množstvím kyseliny, agresivní průmyslová atmosféra;
- zvláštní (u které je třeba použít zvláštní opatření pro ochranu materiálu – např. sekundární ochranu, zvláštní druh cementu) - vysoce agresivní chemické prostředí nebo extrémní podnebí.

Rozdělení agresivního prostředí je následující:

- bludné proudy;
- biologické vlivy;
- působení minerálů, olejů a tuků;
- tuhé –  $\text{SO}_4^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ;
- kapalné –  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , pH,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ;
- plynné –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , chlor. [18]

#### 3.1 Působení agresivního plynného prostředí

S vývojem průmyslového odvětví se množství agresivních plynů v atmosféře zvýšilo, například koncentrace oxidu uhličitého, tj.  $\text{CO}_2$ , se za posledních sto let zvýšila z 0,029 % na 0,040 % (viz Obrázek 8). [19] [20] Zvýšená koncentrace plynů v atmosféře má mimo jiné za následek vznik kyselých dešťů a skleníkového efektu.



Obrázek 8 - Nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře v průběhu let [20]

Agresivní plyny, jako jsou oxidy dusíku NO<sub>x</sub> a oxid siřičitý SO<sub>2</sub> vznikají při spalovacích procesech a pokud nejsou zachyceny pomocí filtrů a tzv. koncových technologií, vstupují do atmosféry, kde se přeměňují na kyseliny a ve formě kyselých dešťů dopadají na zemský povrch. V minulosti byla snaha tepláren a elektráren pouze pasivní, tedy pomocí vysokých komínů se spaliny rozptýlily v ovzduší a byly přeneseny na velké vzdálenosti od zdroje. [21] V dnešní době se výrobní snazí o odbourávání těchto nežádoucích plynů například pomocí desulfatace kouřových plynů nebo tzv. selektivní katalytickou a nekatalytickou redukcí NO<sub>x</sub> použitím čpavku nebo močoviny. Bohužel i přes snahy patří stále Česká republika k zemím s více znečištěným ovzduším.

Agresivní plyny působící na stavební materiál, konkrétně na kompozit na cementové bázi, mají za následek vznik nejrůznějších chemických reakcí, které mohou vést k degradaci materiálu. V rámci diplomové práce je dále věnována bližší pozornost dvěma plynům, které lze z hlediska jejich výskytu v ovzduší a působení na cementové kompozity shledat jako zásadní a to konkrétně oxidu uhličitému CO<sub>2</sub> a oxidu siřičitému SO<sub>2</sub>.

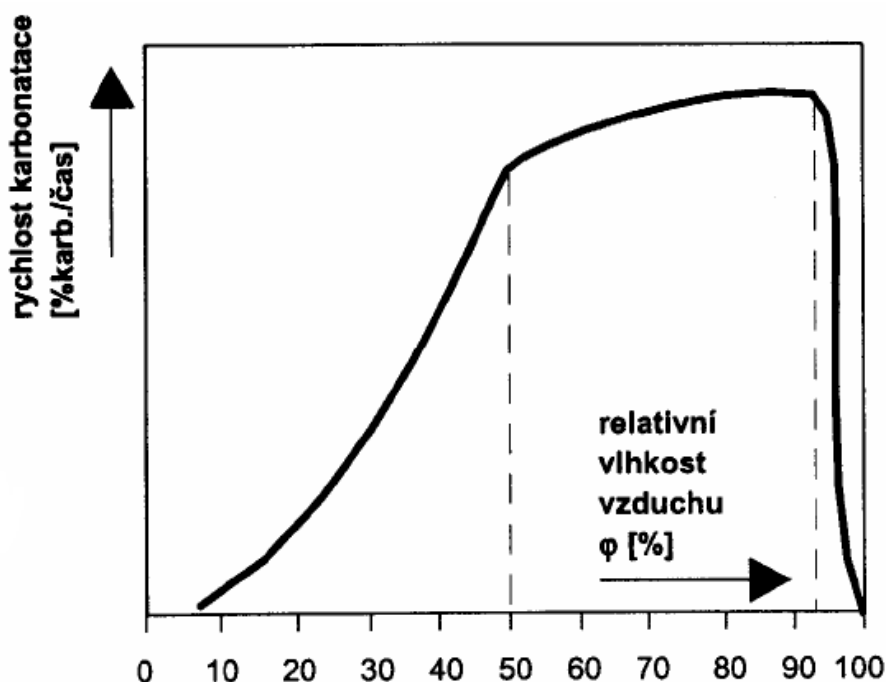
### 3.1.1 Oxid uhličitý CO<sub>2</sub>

Oxid uhličitý je jeden z plynů obsažený v zemské atmosféře a jeho koncentrace se pohybuje okolo 407,72 ppm (stanoveno v roce 2017 Národním úřadem pro oceán a atmosféru) [20]. Koncentrace oxidu kolísá v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu,

na výšce nad povrchem a na místních podmínkách. Vyšší množství lze očekávat v oblastech s vulkanickou aktivitou, s ložisky minerálních vod, se spalovnami a elektrárnami, se zemědělskými objekty, kde je ustájeno velké množství zvířat, a výrobkami například cementu.

## Karbonatace

Z hlediska vlivu na stavební výrobky je oxid uhličitý významným činitelem, který ovlivňuje jejich trvanlivost. Oxid uhličitý při styku s cementovým tmelem, jehož součástí jsou zásadité hydratační produkty, způsobí neutralizační rovnici, která se obecně nazývá karbonatace. Název je odvozen od výsledných produktů, kterými jsou karbonáty. Pro průběh karbonatace je důležitá vzdušná vlhkost, bez ní by pravděpodobně reakce vůbec neproběhla. Naopak při velmi vysoké relativní vzdušné vlhkosti se póry kompozitu zaplní vodou a brání tak hlubšímu pronikání plynu. Existuje tedy určité optimum vlhkosti, meze relativní vlhkosti, při které bude karbonatace probíhat s nejvyšší rychlostí. Rychlost karbonatace v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti je znázorněna na grafu níže (Obrázek 9).



Obrázek 9 - Rychlost karbonatace v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti [2]

Průběh neutralizačních procesů je doprovázen měnící se hodnotou pH a vznikem uhličitany vápenatých  $\text{CaCO}_3$ . Uhličitany se postupně usazují v pórech a kapilárách a zabraňují tak dalšímu přísunu  $\text{CO}_2$ . Usazování uhličitany má za příčinu zvyšování se

objemové hmotnosti betonu v povrchové vrstvě a změnu mikrostruktury kompozitu. Z velmi hutného cementového kompozitu se tato skutečnost projevuje snížením propustnosti a zabránění pronikání dalšího CO<sub>2</sub>. U kompozitů s větším množstvím pórů dochází k další korozi směrem k jádru, protože uhličitanové novotvary nejsou schopny vyplnit veškeré prostory pórů. Na hloubce karbonatace se podílejí veškeré kapiláry a póry obsažené v daném kompozitu, nevyjímaje póry v kamenivu. Gelové póry, které jsou za normálních podmínek zaplněné vodou se na pronikání CO<sub>2</sub> nepodílejí.

Další složky ovlivňující rychlost karbonatace je koncentrace CO<sub>2</sub>, množství přítomného CaO v betonu, druh cementu, dávkování cementu. Bylo dokázáno, že betony obsahující velké množství cementu zabraňují průniku více CO<sub>2</sub> než betony obsahující strusky a popílků.

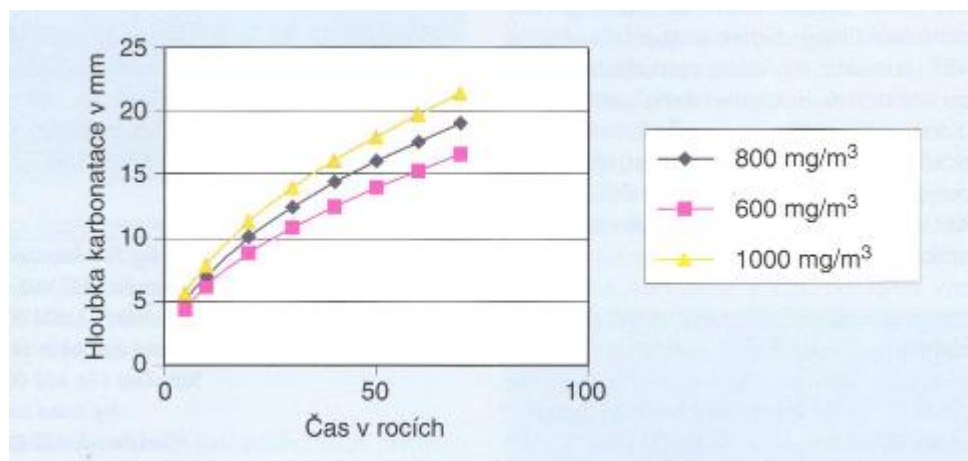
Velký vliv na rychlost karbonatace má také vodní součinitel. V betonech s vysokým vodním součinitelem se vytvářejí trhliny a kapiláry nejvýrazněji v rozhraní matrice a hrubého kameniva. Tyto poruchy dopomáhají snadnějšímu průniku CO<sub>2</sub> do struktury kompozitu. [2] [18]

### ***Procesy při karbonataci***

Oxid uhličitý CO<sub>2</sub> v počátku napadá reaktivní portlandit Ca(OH)<sub>2</sub>, který vznikl při hydrataci trikalciumpilikátu (C<sub>3</sub>S – alit) a je rozpuštěn v pórech. Touto reakcí vzniká uhličitan vápenatý CaCO<sub>3</sub> v kalcitové formě, která vykrytalizuje v pórech betonu. Vzhledem k prostoru v pórech nevznikají žádné poruchy, a proto se tato fáze považuje za neškodnou. Reakcí portlanditu s oxidem uhličitým se koncentrace roztoku sníží a tak dochází k dalšímu rozpouštění Ca(OH)<sub>2</sub>, čímž se celý proces opakuje. Výsledné produkty svým zvětšeným objemem vyplňují póry a kapiláry, zvyšují hutnost a značně zpomalují rychlost karbonatace.

V závislosti na průběhu karbonatace se také snižuje pH mezizrnného roztoku, v počátečních procesech z hodnoty pH 12,4 na hodnotu 9. Což vede k nestálosti dalších hydratačních produktů a ke korozi výztuže u vyztužených betonů.

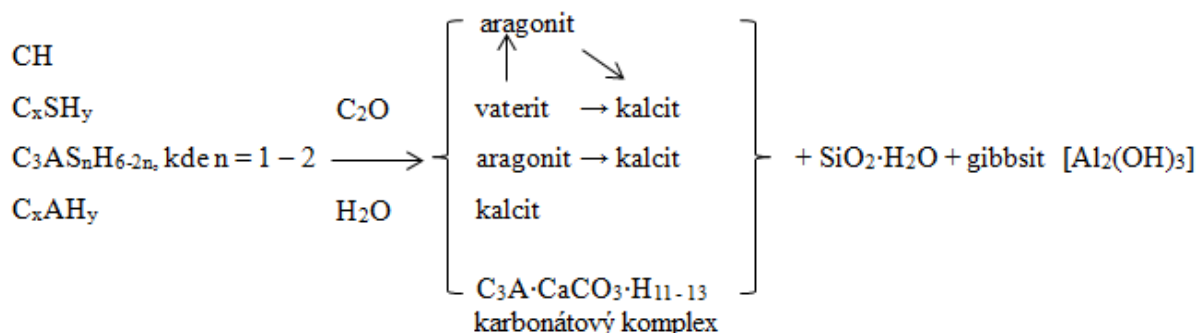
Ve zjednodušeném modelu probíhá karbonatace od povrchu k vnitřním částem. Přitom oxid uhličitý difunduje postupně skrz zkarbonatované vrstvy a tím vrstvy zvětšuje. Hloubka karbonatace je tedy závislá na rychlosti difúze oxidu uhličitého povrchovými vrstvami, která je zase ovlivněna koncentrací oxidu. Tato závislost je pro lepší ilustraci vyjádřena grafem na Obrázku 10.

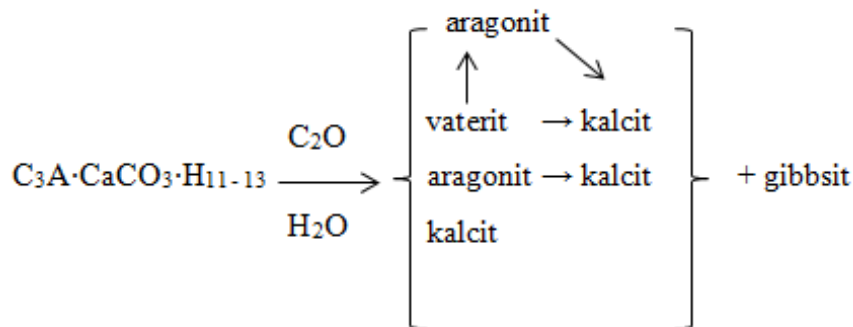


Obrázek 10 - Hloubka karbonatace v závislosti na koncentraci  $CO_2$  a času [ 22]

K určení v jakém stádiu karbonatace se daný kompozit nachází, ovšem nestačí pouze určit hloubky karbonatace, množství vzniklého uhličitanu vápenatého a pH vrstev. Nejzásadnějším ukazatelem stupně karbonatace je určení modifikací  $CaCO_3$ , které jsou přítomny ve zkarbonatovaném betonu. Kromě kalcitu zde můžeme nalézt vaterit a aragonit.

Konečné stadium karbonatace se projeví přítomností aragonitu a kalcitu, který vznikne překrystalizováním aragonitu nebo vateritu. Tyto krystaly se nejdříve objevují v pórech a kapilárách a posléze v celé struktuře cementového tmele. Krystaly vytváří velké krystalizační tlaky, které na beton působí velice škodlivě a narušují jeho strukturu. [2] Vznik a přeměna uhličitanů na jednotlivé modifikace je vyjádřen pomocí těchto schémat na Obrázku 11.





Obrázek 11 - Mechanismus vzniku a přeměn jednotlivých uhličitanů vlivem karbonatace [18]

### Stádia karbonatace

#### 1. etapa

V tomto stádiu dochází k přeměně rozpustného portlanditu na nerozpustný uhličitan, který svým zvětšeným objemem zaplňuje póry. Zvyšuje se objemová hmotnost a klesá propustnost. Na vlastnosti cementového kompozitu působí výsledné produkty pozitivně.

#### 2. etapa

Ve druhé etapě následují přeměny ostatních hydratačních produktů. Jednotlivé procesy jsou vyobrazeny na schématu výše. Dále vznikají nejrůznější modifikace vápenatých uhličitanů, které se společně s amorfním gelem kyseliny křemičité vyskytují v místech, kde se dříve nacházely hydratační produkty. Uhličitanové modifikace jsou ve tvaru velmi jemnozrnných krystalických novotvarů. Vlastnosti kompozitu se nemění a odpovídají počátečním hodnotám.

#### 3. etapa

Tato etapa se vyznačuje překrystalizováním jemnozrnných novotvarů na hrubozrnné uhličitaný (aragonit a kalcit), které jsou až desetkrát větší než původní krystaly. Mechanické vlastnosti kompozitu se postupně zhoršují a také dochází k výraznému snížení pH hodnoty.

#### 4. etapa

V poslední etapě dochází k téměř stoprocentní karbonataci. Krystaly aragonitu a kalcitu prostupují celou strukturou cementového tmele. Tato skutečnost vede ke vzniku poruch, ke snížení pevnosti a soudržnosti kompozitního systému. Kvůli velmi nízké hodnotě pH dochází ke korozi výztuže v železobetonu. Ke korozi ve většině případů

dochází vlivem nižšího pH již před dosažením čtvrté etapy. Tato skutečnost se vysvětluje tím, že koroze výztuže postupuje rychleji než samotná destrukce cementového tmelu karbonatací. [2] [18]

### ***Kritéria pro posouzení stavu degradace***

*Stupeň karbonatace (4):*

$$^{\circ}K = \frac{CaO_{karb.}}{CaO} \cdot 100 \quad (4)$$

$^{\circ}K$  – stupeň karbonatace [%];

$CaO$  – celkový obsah oxidu vápenatého [-];

$CaO_{karb.}$  – obsah oxidu vápenatého vázaného na uhličitán vápenatý [-].

*Stupeň modifikační přeměny (5):*

$$^{\circ}MP = \frac{CaCO_3_{hrub.}}{CaCO_3_{jemnoz.}} = \frac{CO_2 h}{CO_2 j} \quad (5)$$

$^{\circ}MP$  – stupeň modifikační přeměny [-];

$CaCO_3_{hrub.} = CO_2 h$  – obsah hrubozrnných uhličitánových produktů [-];

$CaCO_3_{jemnoz.} = CO_2 j$  – obsah jemnozrnných uhličitánových produktů [-].

Dle předchozích vztahů a následující Tabulky 1 lze zkarbonatovaný kompozit na cementové bázi zařadit do etapy karbonatace. [2] [18]

*Tabulka 1 - Kritéria pro zařazení betonu do etapy karbonatace [2]*

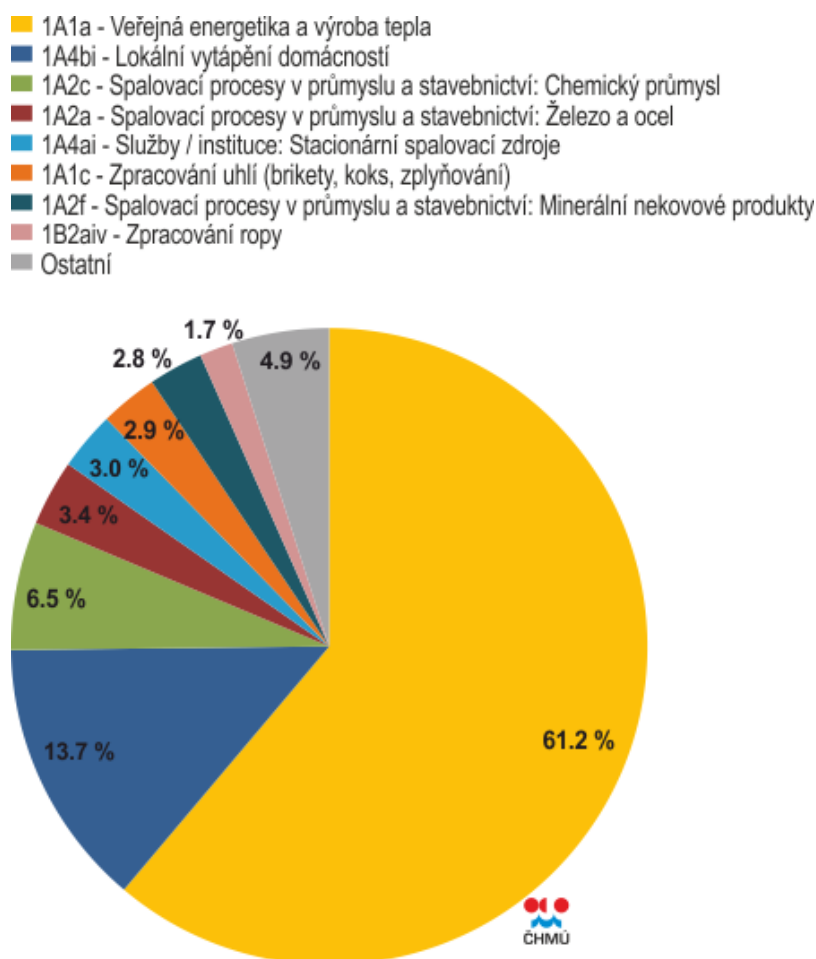
Etapa karbonatace	Stupeň karbonatace $^{\circ}K$ [%]	Stupeň modifikační přeměny $^{\circ}MP$ [-]	pH [-]
I.	< 55	> 0,5	> 10,8
II.	55 - 73	0,5 - 0,4	10,8 - 9,6
III.	73 - 85	0,4 - 0,8	9,6 - 8,0
IV.	> 85	> 0,8	< 8,0

### **3.1.2 Oxid siřičitý $SO_2$**

Oxid siřičitý je dalším velice agresivním oxidem, který se vyskytuje například v sopečných plynech, v podzemních minerálních vodách rozpuštěný jako kyselina siřičitá a v neposlední řadě vzniká jako vedlejší produkt při spalování fosilních paliv,

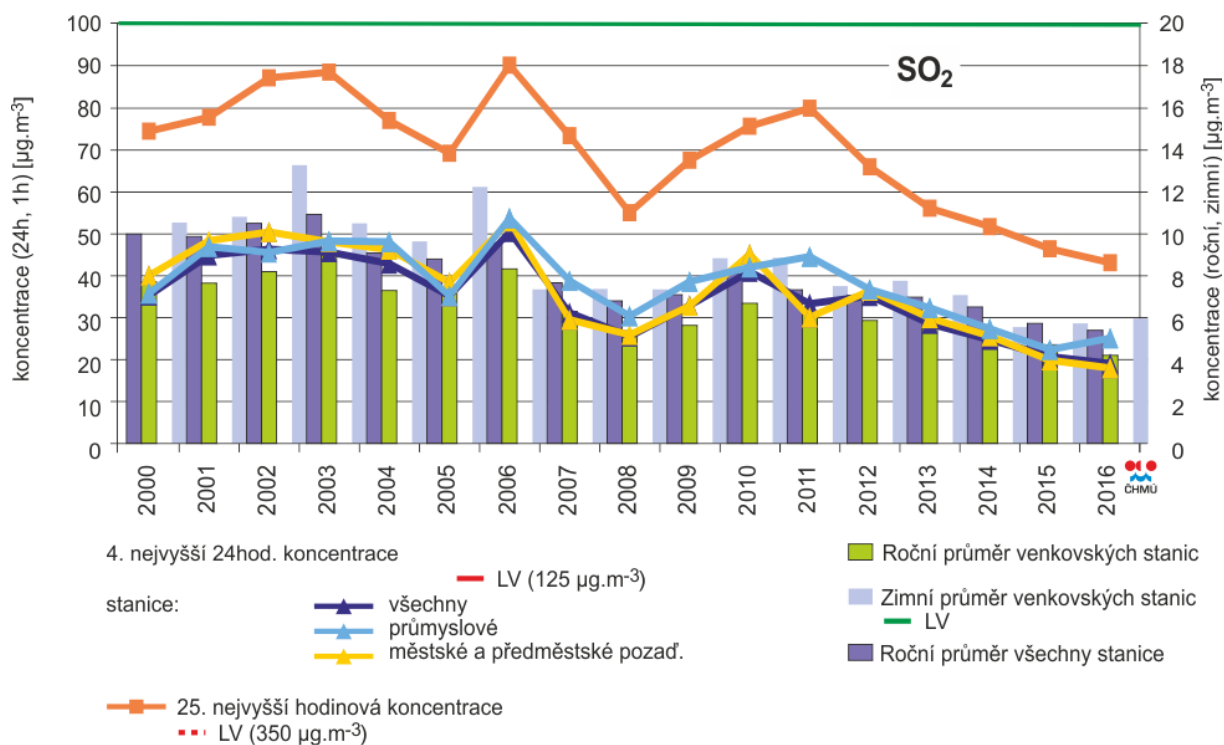


např. méně kvalitního hnědého uhlí. Podmínkou pro vznik  $\text{SO}_2$  je obsah volné síry nebo pyritu  $\text{FeS}_2$  v hnědém uhlí. Oxid siřičitý je velice toxický pro rostliny, neboť narušuje průběh fotosyntézy. Jak už bylo řečeno  $\text{SO}_2$  patří mezi zplodiny způsobující kyselé deště, z tohoto důvodu je nezbytné odsiřování kouřových plynů z elektráren a dalších průmyslových výroben. Jaké mají jednotlivé průmyslové sektory podíl na emisích  $\text{SO}_2$  v ČR za rok 2015, je zobrazeno v grafu níže (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 - Podíly průmyslových sektorů na celkových emisích  $\text{SO}_2$  za rok 2015 [23]

Běžná koncentrace oxidu siřičitého v přírodě je pod hodnotu  $0,01 \text{ mg/m}^3$  vzduchu. Nejvyšší přípustné koncentrace  $\text{SO}_2$  ve vzduchu za 24 hodin je  $125 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  a krátkodobě hodnota nesmí překročit mez  $350 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ . Oproti přírodnímu prostředí se ve městech koncentrace oxidu siřičitého silně zvyšuje v zimním období. Závislost je možno vidět v grafu na Obrázku 13, kde je také zobrazen zřetelný celkový pokles koncentrace  $\text{SO}_2$  v průběhu let vlivem zmíněného odsiřování. [23]



Obrázek 13 - Trendy ročních charakteristik SO<sub>2</sub> v ČR v období 2000 – 2016 [23]

Oxid siřičitý SO<sub>2</sub> je až desetkrát agresivnější než oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, při stejné koncentraci, a patří k nejškodlivějším oxidům jak u nás, tak v zahraničí. [18]

## Sulfatace

Působením oxidu siřičitého na cementový kompozit způsobuje tzv. sulfataci. Tento název je odvozen od finálních produktů, které při sulfataci vznikají. Jsou to vápenaté sulfáty, především sádrovec.

### Vliv vlhkosti na reakci s oxidem siřičitým SO<sub>2</sub>

Typická pro degradaci betonu je skutečnost, že se zvyšující se vlhkostí roste i stupeň sulfatace. Množství vlhkosti ovlivňuje nejen rychlost probíhajících chemických reakcí, ale také kvalitativní a kvantitativní zastoupení produktů v jednotlivých fázích sulfatace. Kvalitativní složení produktů je řízeno koncentrací SO<sub>2</sub>, rychlostí jeho absorpce, dobou působení a zejména rychlostí chemických reakcí.

Působením SO<sub>2</sub> v betonu může docházet k úplnému rozkladu struktury a vzniku nejrůznější meziproduktů a finálních novotvarů. Mezi ně patří hemihydrát siřičitanu vápenatého CaSO<sub>3</sub> · ½ H<sub>2</sub>O, hemihydrát síranu vápenatého CaSO<sub>4</sub> · ½ H<sub>2</sub>O, dihydrát síranu vápenatého CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O, který se označuje jako minerál sádrovec. Hemihydrát

siřičitanu vápenatého  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  je zde zastoupen jako meziprodukt, protože pokračováním sulfatace se oxiduje na dihydrát síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , tedy na sádrovec. V tomto momentě je předně rozhodující obsah vlhkosti. Pokud je vlhkost příliš nízká a nepřekračuje hodnotu 4 % z hmotnosti kompozitu, pak se degradace zastavuje a vzniká především hemihydrát siřičitanu vápenatého  $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ .

Růstem vlhkosti se sulfatace stává rychlejší a úplnější. Do 5% vlhkosti se množství produktů ( $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$ ) zvyšuje. Při dalším zvyšování do 25 % vlhkosti je obsah produktů konstantní, mění se pouze zastoupení jednotlivých minerálů. [2]

### ***Vliv relativní vlhkosti prostředí a koncentrace $\text{SO}_2$ na fyzikálně-mechanické vlastnosti***

Procesy závislé na relativní vlhkosti vzduchu probíhající při sulfataci jsou obdobné těm, které probíhají při karbonataci. Kromě obsahu vlhkosti betonu, ovlivňuje rychlost probíhajících reakcí také relativní vlhkost vzduchu a koncentrace  $\text{SO}_2$  v ovzduší. Relativní vlhkost má rovněž vliv na množství a tvar vzniklého finálního produktu, a sice sádrovce. Tato skutečnost působí i na hodnotu pH betonu.

Co se týče fyzikálně-mechanických vlastností, lze zkonstatovat, že s počátečním působením síranové koroze se pevnosti kompozitu mírně zvyšují, v důsledku zaplnění pórů novotvory. Ovšem další přítomností agresivního  $\text{SO}_2$  se koroze dále prohlubuje a to má za následek vznik poruch a snížení pevností. Narušení struktury je způsobeno tzv. síranovým rozpínáním, kdy vzniklé krystaly sádrovce zaujímají větší objem, konkrétně 1,5 krát větší, než původní složky systému. Pro lepší ilustraci jsou v následujících Tabulkách 2 a 3 uvedeny hodnoty krystalizačních tlaků vybraných sloučenin při jejich hydrataci v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu a teplotě. [2] [18]

*Tabulka 2 - Krystalizační tlaky [MPa] vybraných sloučenin při hydrataci v závislosti na relativní vlhkosti prostředí a teplotě [18]*

Relativní vlhkost vzduchu [%]	Přeměna								
	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ na $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$			$\text{MgSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ na $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$			$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ na $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$		
	0 °C	20 °C	60 °C	10 °C	20 °C	30 °C	0 °C	20 °C	30 °C
100	219	175,5	92,6	14,6	11,7	9,2	93,8	61,1	43
80	-	-	-	-	-	-	63,7	28,4	9,4
70	160	114,5	15,4	9,7	6,8	4	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	24,3	-	-
50	107,2	57,5	0	5	1,9	0	-	-	-

Tabulka 3 - Krystalizační tlaky vybraných sloučenin ( $c/c_a$  = hodnota přesycení roztoku v kapilárách betonu) [18]

Druh chemické sloučeniny	Tlaky od krystalizace [MPa]			
	$c/c_a = 2$		$c/c_a = 10$	
	0 °C	50 °C	0 °C	50 °C
$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$	33,5	39,8	112	132,5
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	28,2	33,4	93,8	111
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	10,5	12,5	35	41,5
$\text{MgSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	11,8	14,1	39,5	49,5
$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	27,2	32,4	91	107,9
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	7,2	8,3	23,4	27,7
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	29,2	34,5	97	115
$\text{NaCl}$	55,4	65,4	184,5	219
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	7,8	9,2	25,9	30,8
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	10	11,9	33,4	36,5
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	28	33,3	93,5	110,9

### ***Stádia sulfatace***

Dle Drochytky a Matouška [2] jednotlivé etapy sulfatace jsou obdobou etap karbonatace s tím rozdílem, že v případě sulfatace může nastat ještě pátá etapa.

#### ***1. etapa***

V tomto období se vlivem působení oxidu siřičitého přeměňuje portlandit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , konkrétně jeho roztok, na nový produkt hemihydrát siřičitanu vápenatého  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ . Tento novotvar zaplňuje částečně póry a tím se pevnosti kompozitu zvyšují. Hodnota pH se výrazně snižuje.

#### ***2. etapa***

V této etapě se i ostatní hydratační produkty cementu přeměňují na siřičité a síranové produkty. Vzniklé produkty taktéž vyplňují volné póry betonu a ještě více zvyšují mechanickou pevnost.

Jelikož sulfatace úzce souvisí s karbonatací a jejich vliv je ve většině případů v praxi synergický, můžeme v této etapě uvažovat i o přeměně karbonátových novotvarů. Oxid siřičitý jako reaktivnější plyn rozkládá karbonatační produkty,

konkrétně kalcit, a vytváří z nich siřičité a síranové novotvary [24], které se projeví vyšší pevností a objemovou hmotností, než je tomu u produktů karbonátace.

Kromě sulfatačních produktů, zde může vznikat kombinovaným působením síranů a oxidu uhličitého minerál zvaný thaumasit  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15 \text{H}_2\text{O}$ . Tento minerál je krystalovou strukturou podobný ettringitu  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ . [25] Thaumasit ovšem většinou vzniká za předpokladu snížené teploty pod  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , z důvodu lepší rozpustnosti portlanditu a oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$  ve vodě, nižší rozpustnosti thaumasitu a v neposlední řadě vyšší stability skupiny  $\text{Si}(\text{OH})_6$ . [26]

### *3. etapa*

Tato etapa je charakterizována překrytím primárně vzniklého hemihydrátu siřičitanu vápenatého a hemihydrátu síranu vápenatého na sekundární produkt sádrovec, který se vyznačuje zvětšeným objemem. Na začátku této etapy se mechanické pevnosti zvýší na maximum. Při přechodu z třetí etapy do čtvrté tyto pevnosti ovšem výrazně klesnou, kvůli narušení struktury sádrovcem.

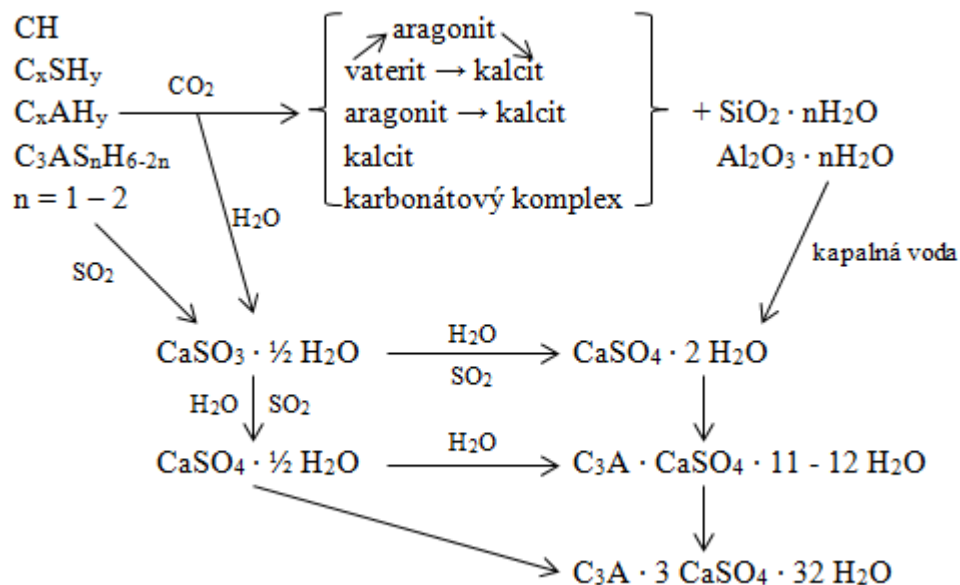
### *4. etapa*

Hrubozrnné krystaly sádrovce prostupují celou strukturou kompozitu a silně narušují pevnosti a soudržnost betonu. Tato etapa se projeví výrazným poklesem pevností.

### *5. etapa*

Pokud je beton střídavě provlhčován může zde nastat pátá etapa, která se vyznačuje zřetelnějším rozpadem betonu. Což je způsobené nově vzniklým trisulfátem, jinak nazývaným Candlotova sůl či ettringit  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ , který zvětší svůj objem 8 – 11 krát než původní krystaly, z nichž je ettringit vytvořen. [27] Dalším produktem může být monosulfát  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 11 - 12 \text{H}_2\text{O}$ . Podmínkou pro vznik ettringitu, resp. monosulfátu, je přítomnost vody v kapalné formě, míra obsahu  $\text{C}_3\text{A}$  (trikalcium aluminátu) v cementu a přítomnost rozpustných síranů. [2]

Průběh reakcí a vznik novotvarů je znázorněn v tomto schématu (Obrázek 14).



Obrázek 14 - Schéma mechanismu sulfatace betonu [18]

### Kritéria pro posouzení stavu degradace vlivem sulfatace

Stupeň sulfatace je dle [2] vyjádřen následně (teoretický vztah):

$$\text{°S} = \frac{\text{CaSO}_4 \cdot \frac{M_{\text{CaO}}}{M_{\text{CaSO}_4}} + \text{CaSO}_3 \cdot \frac{M_{\text{CaO}}}{M_{\text{CaSO}_3}} - \text{SO}_3 \cdot \frac{M_{\text{CaO}}}{M_{\text{SO}_3}}}{\text{CaO} - \text{SO}_3 \cdot \frac{M_{\text{CaO}}}{M_{\text{SO}_3}}} \cdot 100$$

(6)

°S – stupeň sulfatace [%];

$M_{\text{CaO}}, M_{\text{SO}_3}, M_{\text{CaSO}_3}, M_{\text{CaSO}_4}$  – molární hmotnosti [g/mol];

$\text{CaO}, \text{SO}_3, \text{CaSO}_4, \text{CaSO}_3$  – obsahy daných sloučenin [%].

Stupeň sulfatace (exaktní vztah) [2]:

$$\text{°S} = \frac{0,700 \cdot \text{SO}_3 + 0,875 \cdot \text{SO}_2}{\text{CaO}} \cdot 100$$

(7)

°S – stupeň sulfatace [%];

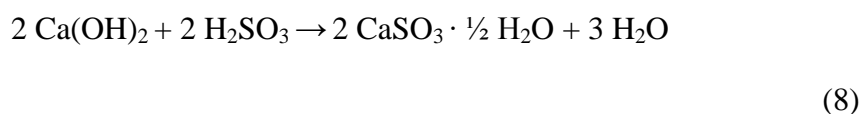
$\text{CaO}, \text{SO}_3, \text{SO}_2$  – obsahy daných sloučenin [%].

### ***Sulfatace cementové malty***

Při působení oxidu siřičitého na cementovou maltu se lze běžně setkat s prakticky stejným mechanismem, jako je tomu u betonů. Koroze vlivem sulfatace se v prvních dnech výrazně neprojevuje, ovšem i malá koncentrace oxidu siřičitého má vliv na pokles obsahu portlanditu v cementovém tmelu a na tvorbu siřičitých novotvarů.

Pokud je zde přítomna i určitá relativní vlhkost, pak prostřednictvím nových produktů se značně mění mechanické pevnosti. Na povrchu malty se začínají uzavírat póry a dutiny a dochází tak ke zpevnění povrchu, tedy ke zvýšení mikrotvrdosti. Hodnota mikrotvrdosti je zpočátku ovlivňována spíše koncentrací oxidu než relativní vlhkostí.

Poklesem obsahu portlanditu, nositele alkality v maltě, se výrazně sníží hodnota pH a zároveň se úměrně zvýší obsah sulfatačních produktů. Ve stádiu, kdy už není portlandit v maltě přítomen, se mohou objevovat silné výkvěty na povrchu malty. Tyto výkvěty jsou složeny z krystalů hemihydrátu siřičitanu vápenatého, hemihydrátu síranu vápenatého a dihydrátu síranu vápenatého. Proces výkvětu je vysvětlen touto chemickou rovnicí neutralizace:



Z rovnice (8) je patrné, že vzniklou vodou materiál navlhá a vytváří se výkvěty. Vytvářením výkvětů a intenzivní koroze v oblasti povrchových vrstev se mikrotvrdost, pevnost povrchových vrstev, a pevnost v tlaku snižuje. Vše ovšem závisí také na koncentraci oxidu siřičitého v ovzduší.

Bylo také zjištěno, že se zvyšujícím se obsahem agresivních plynů  $\text{CO}_2$  a  $\text{SO}_2$  v ovzduší a s dobou koroze se zvyšuje tepelná vodivost malty.

Při synergickém působení oxidu uhličitého a siřičitého probíhá koroze stejným způsobem jako u betonu. V prvních fázích, vlivem vyšší obsahu  $\text{CO}_2$  v ovzduší, oxid uhličitý reaguje s portlanditem za vzniku vápenatých uhličitánů. Zatímco koroze oxidem uhličitým probíhá hlouběji do matrice, oxid siřičitý začíná rozkládat jemnozrné uhličitany v povrchových vrstvách malty. Další etapou sulfatace, je přeměna zbývajících produktů karbonatace na produkty sulfatace. Tyto produkty, jak už bylo řečeno, se vyznačují zvětšeným objemem.

Důležitou poznámkou je, že, pokud koncentrace oxidu siřičitého není výrazně vyšší v poměru k oxidu uhličitému a pokud je malta hutná, pak k vyšším etapám sulfatace dochází až po dlouhé době. Z tohoto důvodu, může takováto malta sloužit po určitou dobu jako ochrana proti agresivním plynům. [2] [18]

### ***Aktuální poznatky zkoumání vlastností cementových malt vystavených SO<sub>2</sub>***

V rámci výroby surového železa a oceli vzniká velké množství vedlejšího produktu, vysokopecní strusky, kterou je možné po řádné úpravě použít do betonů a malt jako částečnou náhradu cementu či kameniva. Touto problematikou se zabýval španělský výzkumný tým [28], který zároveň ověřoval chování cementových malt s přidávkou strusky v plynném prostředí oxidu siřičitého SO<sub>2</sub>. Konkrétně Santamaría-Vicario navrhl a ověřil 5 receptur malt s 0%, 25%, 75% a 100% náhradou silikátového kameniva struskou. Zkušební tělesa byly po 7, 28 a 90 dnech podrobeny tzv. Kesternichově testu, jehož postup je uveden v normách DIN 50018 [29] a ČSN ISO 6988 [30]. Kesternichův test představuje postup pro simulaci účinků agresivních průmyslových emisí na různé anorganické materiály. Zde byl tento test použit pro sledování chování malt v agresivním prostředí SO<sub>2</sub>.

Vzorky byly po dobu 8 hodin a při teplotě  $40 \pm 3$  °C vystaveny agresivnímu SO<sub>2</sub> v množství 0,2 dm<sup>3</sup> a po dobu 16 hodin atmosférickému prostředí. Tento cyklus byl opakován celkem 15 krát. Z výsledků zkoušky je zřejmé, že působením plynu se v povrchových vrstvách postupně ukládaly soli, které způsobily zvýšení mikrotvrdosti a i celkové pevnosti malty. Obsah síry uloženého na vnější straně vzorků byl stanoven na cca 20 – 25 % a uvnitř vzorků na 1 – 2 %. Celková hmotnost byla zvýšena v průměru o 1 %. Přes velké množství absorbované síry povrchové vrstvy nejevily žádné známky porušení či nabobtnání. Pevnosti referenční a struskové malty po působení agresivního prostředí se téměř od sebe nelišily. Oproti tomu rozdíl pevností před a po expozici SO<sub>2</sub> byl znatelně vyšší u vzorků neobsahující žádnou strusku. Jeden z důvodů může být i to, že přídavek strusky snížil obsah „zranitelného“ hydroxidu vápenatého ve směsi a tím rychlost sulfatace. Použití strusky při výrobě malty nejen snížíme množství emisí, ale také zlepšíme některé vlastnosti kompozitu. [28]

Junco [31] zase ve své práci sledoval vlastnosti vysoce pórovitých lehkých malt, kde část nebo celé množství kameniva bylo nahrazeno drtí z polyuretanové pěny. Konkrétní náhrada byla v dávkách 0, 25, 50, 75 a 100 % procent z objemu kameniva. Zkušební hranoly byly umístěny do klimatizační komory s SO<sub>2</sub>, byly vystaveny



Kesternichově testu. Na základě studie bylo zjištěno, že použití materiálu s vysokým obsahem pórů přispívá pozitivně na trvanlivost v agresivním prostředí. Vzhledem k dostatečnému prostoru pro vykrystalizování síranových produktů a uvolnění krystalizačních tlaků, se nevytvoří výrazné poruchy struktury. Navíc nahrazením silikátového kameniva se sníží ekonomická náročnost malty a zároveň lze zabránit nebezpečí výskytu alkalicky křemičité reakce. [31]

### ***Reakce produktů sulfatace ve vysokých teplotách***

Působením samostatného agresivního oxidu siřičitého nebo v kombinaci s oxidem uhličitým vznikají v materiálu nejrůznější produkty, které byly popsány v dřívějších kapitolách. Vlivem dlouhodobé sulfatace se jejich přítomnost v materiálu prohlubuje a jejich forma se může měnit v závislosti na konkrétních vnějších podmínkách.

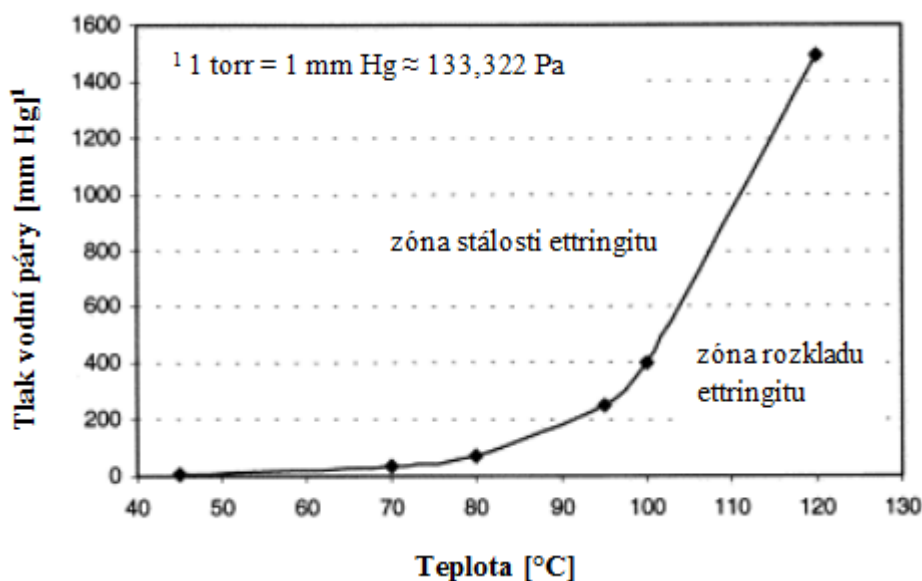
Již byl zmíněn vliv vlhkosti materiálu a relativní vlhkosti ovzduší na vznik a stabilitu síranových / uhličitánových novotvarů za atmosférických podmínek, ale doposud nebyla probrána stabilita produktů sulfatace za vyšších teplot. Pomocí extrémních teplot můžeme simulovat reakce probíhající v degradovaném betonu při požáru.

Expozicí za vysokých teplot dochází především v cementovém kompozitu k nejrůznějším rozkladům, které jsou blíže popsány v kapitole týkající se vysoké teploty. V této kapitole je důraz kladen především na rozkladné procesy síranových sloučenin.

Jedním z produktů síranové koroze je sádrovec  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , který je stálý cca do 40 °C. Nad touto teplotou postupně dehydratuje (při teplotě 110 °C) za vzniku hemihydrátu síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ . Rozklad je doprovázen na jedné straně spotřebou tepla, tedy jistou ochranou před požárem, ale na druhé snížením pevnosti. [27] Při dalším zvyšování teploty (okolo 200 °C) se teplotně nestabilní hemihydrát rozkládá na anhydrit síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4$ , který posléze za teploty 350 – 400 °C dehydratuje na  $\text{CaO}$  a  $\text{SO}_3$ . vzniklý plyn může ve struktuře kompozitu vytvořit póry a kapiláry, čímž opět sníží celkové pevnosti. [32]

Ettringit  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ , jako další novotvar síranové koroze, začíná být nestabilní již při teplotách kolem 100 °C. Po dosažení teploty 114 °C se mění na tzv. meta-ettringit. Tento minerál se ovšem při dalším zvyšování teploty změní částečně na krystalickou a částečně na amorfni fázi. Konkrétními finálními produkty

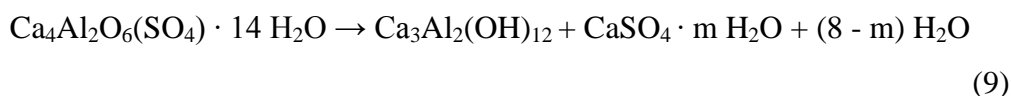
mohou být hemihydrát síranu vápenatého, voda, amorfni fáze a AFm fáze – monosulfát  $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12 H_2O$ . Rozklad ettringitu v závislosti na teplotě a tlaku je zobrazeno v grafu na Obrázku 15. [33]



Obrázek 15 - Vliv teploty a tlaku na rozklad ettringitu [33]

V některých výzkumech [34] se uvádí, že postupným snížením teploty za přítomnosti vlhkého prostředí lze původní ettringit obnovit. Co však nelze obnovit, je původní struktura materiálu, která byla porušena tlakem páry při rozkladu ettringitu a krystalickým napětím při jeho opětovném vzniku.

Ettringitový produkt monosulfát není samozřejmě konečnou formou. Nad 230 °C se přeměňuje dle následující rovnice (9) na nerozpustný hemihydrát / anhydrit síranu vápenatého a hydrogarnet, který později také přechází na anhydrit. [35]



$$m = 0 - 0,5$$

Posledním ze sledovaných sloučenin je minerál thaumasit  $CaO \cdot SiO_2 \cdot CaSO_4 \cdot CaCO_3 \cdot 15 H_2O$ , jehož struktura se skládá z křemíku, který je obklopený šesti hydroxylovými skupinami. Thaumasit je poměrně stabilním minerálem s počáteční teplotou rozkladu  $> 110$  °C, kdy vznikne tzv. thaumasitové sklo s neorganizovanou krystalovou strukturou. [11] [26] Je tedy teoreticky stabilnější než ettringit, který má teplotu počátečního rozkladu nižší.

Z výše uvedeného plyne, že při zvyšující se teplotě v případě cementových kompozitů vystavených působení siřičitanů v plynné formě dochází k nezanedbatelným změnám z hlediska dekompozice vzniklých síranových produktů ve struktuře, obsahující případné poruchy, těchto kompozitních systémů, a proto je problematika výzkumu, při vývoji nových hmot, v této oblasti velmi žádoucí a aktuální.

## D Experimentální část

Experimentální část diplomové práce byla věnována návrhu a ověření receptur lehkých malt na bázi polymercementové matrice tak, aby bylo dosaženo, co nejlepší odolnosti vůči působení kombinace extrémní teploty a agresivního prostředí. Konkrétně se jednalo o vystavení malt cyklickému zmrazování a rozmrazování, resp. cyklického působení oxidu siřičitého a pro oba zmíněné případy následovalo namáhání teplotou až 1200 °C s řízeným pozvolným chlazením. Malty byly podrobeny laboratornímu testování, při kterém byly vhodně kombinovány fyzikálně-mechanické, fyzikálně-chemické (počítačová tomografie) a mikrostrukturní techniky (elektronový mikroskop).

### 4 Metodika experimentální práce

V rámci výzkumu a vývoje optimálních receptur lehkých malt odolných vůči působení nepříznivých vlivů byla experimentální část rozdělena do celkem do osmi etap:

- 1) První etapa – výběr jednotlivých surovin s ohledem na aktuální poznatky a zjištění prezentované v teoretické části práce;
- 2) Druhá etapa – analýza vlastností primárních i alternativních surovin;
- 3) Třetí etapa – návrh prvotních receptur, vytvoření zkušebních vzorků, sledování základních vlastností, příp. vlivu teplotního namáhání;
- 4) Čtvrtá etapa – sestavení optimalizovaných receptur;
- 5) Pátá etapa – výroba zkušebních těles a návrh vč. podrobné specifikace simulace extrémních podmínek;
- 6) Šestá etapa – sledování změn vyvíjených malt v průběhu působení navržených agresivních a extrémních podmínek, zejména sledování vizuálních změn;
- 7) Sedmá etapa – testování zkušebních vzorků lehkých malt z hlediska navrženého komplexního souboru metod kombinujícího základní, fyzikálně-chemické a mikrostrukturní charakteristiky;
- 8) Osmá etapa – souhrn výsledků a celkové vyhodnocení.

#### *První etapa*

Výběrem vhodných surovin lze výrazně ovlivnit chování, tedy odolnost, malt v extrémních podmínkách a další finální vlastnosti lehkých malt na polymercementové bázi. Z tohoto důvodu patří tato etapa společně s **druhou etapou** k nejdůležitějším.

Významným podkladem pro výběr potenciálně se jevících složek vyvíjených malt s důrazem na co nejvyšší uplatnění surovin z alternativních zdrojů byly poznatky a zjištění uvedené v teoretické části. Uvážlivě byly proto vybrány vhodné složky pojiva, plniva (kameniva), příměsí, přísad a rozptýlené výztuže.

### ***Druhá etapa***

V **druhé etapě** byly zjišťovány vlastnosti surovin. Tyto zkoumané parametry byly rozhodující pro sestavení primárních receptur. Značná pozornost byla věnována pórovitému kamenivu, u kterého byla stanovena například sypná hmotnost, objemová hmotnost, křivka zrnitosti a výdrž v teplotně náročných expozičních podmínkách (pomocí pozorovací pece).

Vlastnosti lehkých malt s vysokým obsahem alternativních surovin jsou značně ovlivněny synergickým účinkem těchto příměsí s ostatními složky kompozitního systému. Proto je podstatné sledovat zejména chemický a mineralogický rozbor, který může značně ovlivnit vlastnosti finálního kompozitu, jakož i jeho celkovou trvanlivost. V případě potřeby byla u alternativní příměsí, substituční složky cementu, upravena jemnost mletí, aby se přiblížila měrnému povrchu cementu a bylo tedy dosaženo optima z hlediska kombinace zdobňovacího procesu a výsledné případné reaktivity této složky. Proto byl pro jemnozrné příměsí analyzován i měrný povrch.

### ***Třetí etapa***

Na základě **první a druhé etapy** byly v **třetí etapě** sestaveny primární receptury, které byly průběžně modifikovány až na optimalizované verze. Nejdříve byl na základě zkoušek vybrán typ cementu, poté bylo definováno optimální předvlhčení kameniva tak, aby dále neovlivňovalo zpracovatelnost čerstvé směsi v kombinaci s dosažením dostatečných finálních vlastností. A zároveň byly stanoveny jednotlivé poměry směsi kameniv a poměr kameniva k pojivu. Na základě výsledků z pozorovací pece byla vybrána nejvhodnější příměs a nejvýhodnější procentuální náhrada cementu. Posledním krokem k dosažení **čtvrté etapy** byly úpravy dávek podpůrné příměsí dávkované v minoritním množství, konkrétně rozptýlené výztuže a přísad.

### ***Čtvrtá etapa***

Prostřednictvím výsledků zjištěných při testování složek ve **třetí etapě** bylo sestaveno 6 optimalizovaných receptur, jejichž složení vykazovalo optimální vlastnosti pro navazující testování lehkých malt odolných v extrémních podmínkách.

### ***Pátá etapa***

Dle platných technických norem byla vyrobena zkušební tělesa 6 optimalizovaných receptur a na čerstvých směsích byly stanoveny vybrané vlastnosti, konzistence a objemová hmotnost čerstvé malty.

Na základě poznatků a zjištění učiněných v rámci teoretického studia relevantních aktuálních informací (zejména zahraniční výzkumné práce, studie, technické normy, literatura atd.) byly navrženy a podrobně definovány postupy pro simulaci extrémních podmínek, které umožní simulovat zrychlené testy trvanlivosti s ohledem na přiblížení se pokud možno co nejvěrněji reálným expozičním podmínkám

### ***Šestá etapa***

V rámci **šesté etapy** byly sledovány a zaznamenány změny vyvíjených malt v průběhu působení navržených agresivních a extrémních podmínek. Důraz byl zejména kladen na vizuální změny, jako je barva, trhliny a další případné poruchy.

### ***Sedmá etapa***

Vyrobené malty byly testovány ve stáří 28 a 90 dní. Pro tento účel bylo zhotoveno několik sad zkušebních těles, kdy vždy pro jednotlivý parametr po konkrétní expozici byly testovány 3 zkušební tělesa (vyjma vzorků pro mikroskop a tomograf – v tomto případě bylo nutné z časového a ekonomického hlediska počet vzorků omezit):

1. sada – testování základních parametrů ovlivněných teplotní expozicí ve stáří 28 dní;
2. sada – testování základních parametrů ovlivněných teplotní expozicí ve stáří 90 dní;
3. sada – testování základních parametrů, analyzování struktury a mikrostruktury po vystavení cyklickému zmrazování/rozmrazování následovaným expozicí při extrémních teplotách ve stáří 90 dní;
4. sada – testování základních parametrů, analyzování struktury a mikrostruktury po vystavení cyklickému působení oxidu siřičitého následovaným expozicí při extrémních teplotách ve stáří 90 dní.

Z fyzikálně-mechanických vlastností byly stanoveny objemové hmotnosti v zatvrdlé malty, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Kromě uvedených zkoušek byla nedestruktivně sledována trojrozměrná vnitřní struktura pomocí počítačové tomografie (CT). Mikrostruktura byla analyzována rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM).

### ***Osmá etapa***

V rámci **osmé etapy** byly všechny stanovené výsledky a výstupy vzájemně porovnávány (zejména vynesáním průměrných hodnot do grafů, příp. jsou uvedeny snímky z fotoaparátu, tomografu a mikroskopu), vyhodnoceny a vyvozeny patřičné souvislosti definující vztah mezi složením vyvíjených hmot, jejich vlastnostmi a struktury, resp. mikrostruktury v návaznosti na chování těchto hmot při působení výše zmíněných expozičních podmínek.

## 5 Zkušební metody

### 5.1 Stanovení sypné hmotnosti volně sypaného kameniva

Tato zkouška byla prováděna na základě postupu uvedeného v technické normě ČSN EN 1097-3 – Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. [36]

- *Podstata zkoušky:* Jedná se o zjištění hmotnosti a objemu vysušeného kameniva v odměrném válci a ze zjištěných hodnot se vypočte sypná hmotnost volně sypaného kameniva.
- *Zkušební zařízení:* Vodotěsná válcová nádoba zhotovená z nerezavějícího kovu. Poměr vnitřního průměru k vnitřní výšce nádoby musí být mezi 0,5 až 0,8. Nádoba uvnitř musí být hladká, dostatečně tuhá, aby si udržela svůj tvar při běžném používání. Horní okraj musí být hladký a rovnoběžný se dnem. Pro kamenivo s maximálním zrnem kameniva 4 mm musí mít měřicí nádoba minimální objem 1 l. Dalším použitým zkušebním zařízením jsou váhy s přesností 0,1 % hmotnosti vody, lopatky, pravítko.
- *Zkušební postup a výpočet výsledku:* Zváží se prázdná, suchá a čistá nádoba. Poté se nádoba umístí na vodorovnou plochu a s použitím lopatky se přeplní kamenivem. Opatrně se odstraní přebytečné množství kameniva nad horním okrajem nádoby, přičemž je nutno zabránit segregaci kameniva na povrchu. Povrch kameniva se zarovná pravítkem takovým způsobem, aby nedošlo k zhutnění jakékoliv části povrchu. Poté se plná nádoba zváží a zaznamená se její hmotnost na 0,1 %. Sypná hmotnost volně sypaného kameniva se určí dle vztahu (10):

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (10)$$

$\rho_b$  – sypná hmotnost volně sypaného kameniva [ $\text{kg/m}^3$ ];

$m_1$  – hmotnost prázdné nádoby [kg];

$m_2$  – hmotnost nádoby se zkušební navázkou [kg];

$V$  – objem nádoby [ $\text{m}^3$ ].

Postup se opakuje třikrát a výsledné hodnoty se zprůměrují a zaokrouhlují na nejbližších  $10 \text{ kg/m}^3$ . Kalibrace nádoby, tedy přesné stanovení objemu nádoby, se



provádí pomocí vody, přičemž se zjišťuje přesný objem vody o určité hmotnosti. [36]

## 5.2 Stanovení objemové hmotnosti kameniva

Postup zkoušky a vyhodnocení probíhalo dle normy ČSN EN 1097-6 – Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. [37]

- *Podstata zkoušky:* Objemová hmotnost se vypočte dělením hmotností zjištěných pomocí pyknometrické metody. Metoda se používá pro zrna kameniva propadlá sítím 4 mm a zachycená na zkušební síť 0,063 mm.
- *Zkušební zařízení a pomocné látky:* Technické váhy s přesností 0,1 % hmotnosti zkušební navážky, zkušební síta 0,063 a 4 mm, pyknometr o objemu 500 – 2000 ml, nálevka, sušárna, pitná voda.
- *Zkušební postup a výpočet výsledku:* Zkušební navážka, která musí být > 300 g, se nasype do pyknometru, který obsahuje vodu o teplotě  $(20 \pm 3)$  °C. Kamenivo se nechá nasáknout vodou po dobu 24 hodin. Po uplynutí 24 hodin se pyknometr doplní vodou po okraj a překryje víkem takovým způsobem, aby se vytěsnil veškerý vzduch z pyknometru. Pyknometr se osuší a naplněný zváží. Poté se pyknometr vyprázdní a naplní pouze vodou. Překrytý víkem se opět zváží. Nakonec se nasáknuté kamenivo vysuší a suché zváží. Ze zjištěných hmotností se vypočte objemová hmotnost kameniva dle následujícího vztahu:

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (11)$$

$\rho_a$  – objemová hmotnost navážky kameniva [ $\text{kg/m}^3$ ];

$\rho_w$  – hustota vody [ $\text{kg/m}^3$ ];

$M_2$  – hmotnost pyknometru obsahujícího vzorek nasáklého kameniva a vody [g];

$M_3$  – hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou [g];

$M_4$  – hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky [g]. [37]

### 5.3 Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

V souladu s požadavky technické normy ČSN EN 933-1 – Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor [38] byla posouzena zrnitost kameniva.

- *Podstata zkoušky:* Zkouška sestává z rozřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Velikost otvorů sít a počet sít jsou voleny podle druhu vzorku a požadované přesnosti. Hmotnost částic zachycených na jednotlivých sítích se uvádí ve vztahu k počáteční hmotnosti materiálu. Souhrnný propad jednotlivými sítí se uvádí v procentech číselným způsobem, a pokud se požaduje, tak v grafické podobě.
- *Zkušební zařízení:* Zkušební síta s otvory dle EN 933-2, sušárna s ventilací a s termostatickým ovládním teploty ( $110 \pm 5$ )°C, váhy s přesností  $\pm 0,1$  % hmotnosti zkušební navážky, nádoby, štětce, vibrační zařízení.
- *Zkušební postup a výpočet výsledku:* Minimální velikost zkušební navážky je dle tabulky uvedené v normě stanovena na 0,2 kg pro kamenivo s maximálním zrnem  $\leq 4$  mm. Suchý či vypraný a vysušený vzorek se vysype na sloupec sít, který je umístěn na vibračním zařízení. Sloupec obsahuje víko a dno a určitý počet sít, sestavených na sobě a uspořádaných od horního síta k dolnímu sítu podle zmenšující se velikosti otvorů. Sloupec se mechanicky třese pomocí vibračního zařízení. Poté se síta jedno po druhém odebírají, začíná se sítem s největšími otvory. Dodatečné prosévání se provádí pomocí štětce na jednotlivých sítích, dokud se všechen materiál, který může propadnout jedním sítem, nepřemístí na další síto ve sloupci. Po dokončení prosévání se zachycený materiál na jednotlivých sítích a na dně postupně zváží. Jednotlivé hmotnosti se zaznamenají a vypočítá se souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti. Na základě procentuálních propadů se vytvoří křivka zrnitosti, tedy grafické vyjádření sítového rozboru kameniva. [38]

### 5.4 Sledování změn v průběhu zahřívání – Pozorovací pec

Tento druh peci, zobrazen na Obrázku 16, je opatřen pozorovacím otvorem, do kterého je možno umístit fotoaparát. Celý systém včetně fotoaparátu je připojen k počítači s programem pro nastavení snímání vzorku v peci v přesně daných časových a teplotních intervalech. Pomocí pozorovací pece lze vizuálně posoudit daný materiál

umístěný v peci při určité teplotní expozici. Lze zaznamenat první známky poruch, tavení a slinování. V rámci diplomové práce byla pozorovací pec použita na vzorky pórovitého kameniva a lehkých malt, přičemž nárůst teploty v peci odpovídal 35 °C/min. Průběh teplotní expozice a nárůstu teploty byl kontrolován a při prvních známkách tavení pozorovaného vzorku byla zkouška ukončena. Chlazení bylo pozvolné.



Obrázek 16 - Pozorovací pec propojená s výpočetní technikou a digitálním fotoaparátem pro monitorování hmot za zvyšujících se teplot (Centrum AdMaS)

## 5.5 Stanovení konzistence čerstvé malty za použití střešacího stolku

Pro sjednocení konzistence čerstvých malt jednotlivých receptur byla použita norma ČSN EN 13395-1 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení zpracovatelnosti - Část 1: Zkouška tekutosti thixotropních malt. [39]

- *Podstata zkoušky:* Hodnota rozlití se stanoví změřením průměru rozlitého zkušební vzorku čerstvé malty umístěné na předepsané desce střešacího stolku pomocí předepsaného kovového kužele po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střešacího stolku zvedá a pak volně padá z předepsané výšky.
- *Zkušební zařízení:* Střešací stolek, kovový kužel (Kužel je z korozi-vzdorné oceli nebo mosazi, vysoký  $(60 \pm 0,5)$  mm o vnitřním průměru  $(100 \pm 0,5)$  mm ve spodní části a vnitřním průměru  $(70 \pm 0,5)$  v horní části. Vnitřní povrch kovového kužele

a jeho okraje jsou hladké. Roviny proložené horními a spodními okraji jsou kolmé k jejich osám. Nejmenší tloušťkou stěn kužele je 2,0 mm.), dusadlo (Sestává z tuhé tyče kruhového průřezu z nenasákavého materiálu o průměru cca 40 mm a délce cca 200 mm. Dusací plocha je rovná a v pravém úhlu k délce dusadla. Hmotnost dusadla je  $(0,250 \pm 0,015)$  kg.), posuvné měřidlo do 300 mm s přesností na 1 mm, zednická lžice, špachtle.

- *Zkušební postup:* Zkouška je provedena na dvou vzorcích, jejichž výsledek se zprůměruje. Před každou zkouškou musí být deska a vnitřní povrch včetně okraje kužele ořehn vlhkou tkaninou. Kovový kužel se umístí na střed střešacího stolku a naplní se maltou ve dvou vrstvách. Každá vrstva se pomocí dusadla zhutní 10 lehkými údery. Přebytečná malta se setře pomocí špachtle (viz Obrázek 17). Asi po 15 s se kovový kužel zvedne kolmo vzhůru. Malta se rozlije na střešací stůl 15 nárazy s konstantní frekvencí jednoho zdvihu za cca 1 s (Obrázek 18). Průměr rozlitého koláče se změří měřidlem ve dvou na sebe kolmých směrech s přesností na 1 mm. [39]



Obrázek 17 - Odstranění násypky



Obrázek 18 – Průběh testování konzistence (rozlití) malty

## 5.6 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

Objemová hmotnost čerstvé lehké malty byla vyhodnocena pomocí normy ČSN EN 1015 – 6 – Zkušební metody malt pro zdivo – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty [40].

- *Podstata zkoušky:* Objemová hmotnost čerstvé malty se stanoví jako poměr hmotnosti a objemu, který zaujímá, je-li vnesena a ztuhne předepsaným způsobem do měřicí nádoby daného objemu.
- *Zkušební zařízení:* Měřicí nádoba, špachtle, zednická lžice, lopatka, vibrační stolek, váha s přesností na 1 g.
- *Zkušební postup:* Měřicí nádoba se nejdříve zváží a poté naplní maltou pomocí lopatky, až přesáhne okraje. Měřicí nádoba se umístí na vibrační stolek a vibruje se tak dlouho až nedochází k dalšímu sesedání malty, Během vibrování se přidává další malta tak, aby přesahovala nádobu. Pomocí špachtle se přebytečná malta setře a urovná s horním okrajem měřicí nádoby. Nádoba se očistí tkaninou a pomocí váhy se stanoví hmotnost nádoby s maltou. Dle následujícího vztahu (12) se určí objemová hmotnost čerstvé malty:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_V}$$

(12)

$\rho_m$  – objemová hmotnost čerstvé malty [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$m_1$  – hmotnost prázdné měřicí nádoby [kg];

$m_2$  – hmotnost měřicí nádoby naplněné maltou [kg];

$V_V$  – objem měřicí nádoby [ $\text{m}^3$ ]. [40]

## 5.7 Teplotní expozice

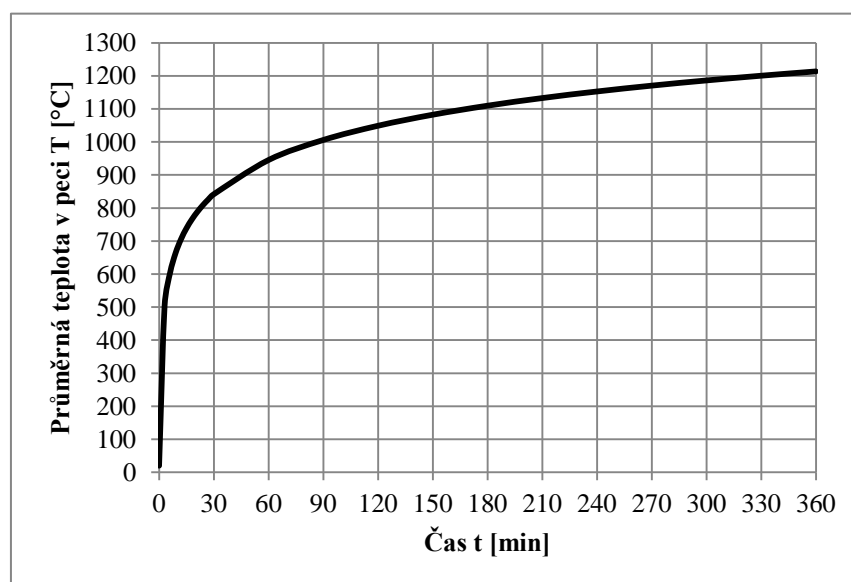
Teplotní expozice probíhala v laboratorních elektrických pecích (Obrázek 21). Zkušební tělesa o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm byla zatěžována vysokými teplotami v několika úrovních, konkrétně  $600^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$  a  $1200^\circ\text{C}$ . Záměrem bylo (samozřejmě dle možností použitých elektrických pecí) přiblížení se průběhu výpalu dle teplotní normové křivky (viz Obrázek 19) uvedené v normě ČSN EN 1363-1 – Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky [41]. Tato křivka je definována následujícím vztahem:

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20$$

(13)

$T$  – průměrná teplota v peci [ $^\circ\text{C}$ ];

$t$  – čas [min].

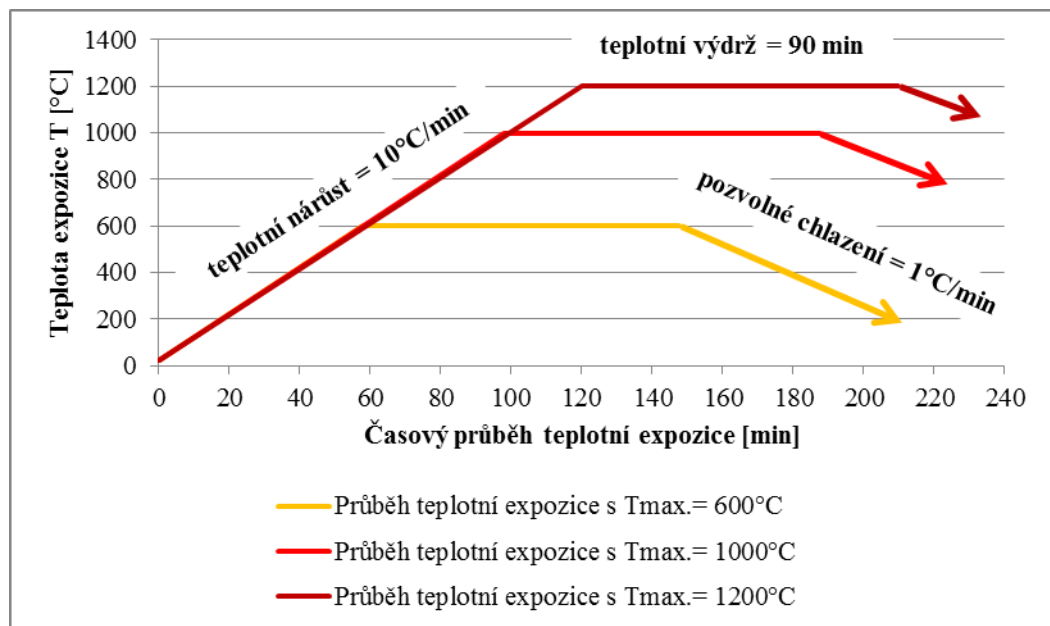


Obrázek 19 - Teplotní normová křivka [41]

V rámci experimentu se nárůst teploty pohyboval na úrovni  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , po dosažení požadované teploty nastala 90 minutová izotermická výdrž a poté pozvolné



chlazení. Konkrétní průběhy jednotlivých teplotních kroků jsou znázorněny v grafu níže (viz Obrázek 20).



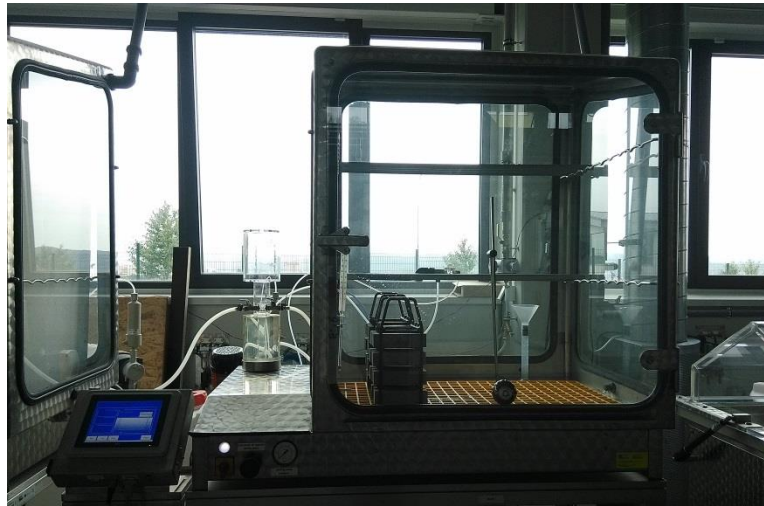
Obrázek 20 - Jednotlivé průběhy teplotních expozic



Obrázek 21 - Elektrická pec se zkušebními tělesy před teplotním zatěžováním

## 5.8 Vystavení agresivnímu plynu SO<sub>2</sub>

Působení agresivního plynu na vzorky lehké malty probíhalo ve zkušební komoře (viz Obrázek 22 a 23), která obsahovala stanovené množství oxidu siřičitého. Požadované množství plynu bylo dávkováno pomocí odměrné nádoby naplněné parafínem. Téměř 100% relativní vlhkost byla vytvářena odpařováním vody na dně komory.



Obrázek 22 - Zkušební komora s SO<sub>2</sub>



Obrázek 23 - Měřicí nádoba naplněná dole plynem a nahoře parafínem

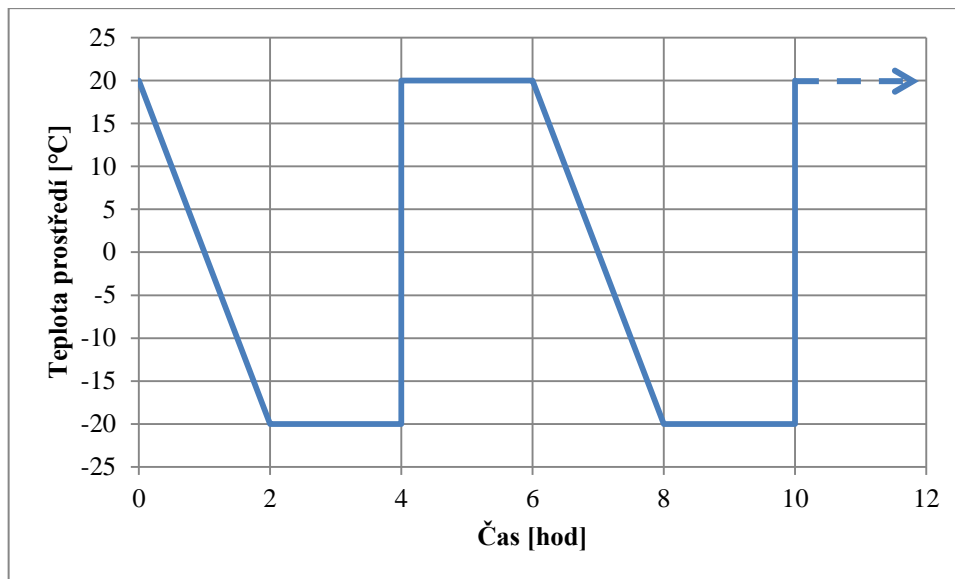


Zkouška probíhala dle upravených požadavků uvedených v normě ČSN EN ISO 3231 - Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti vlhkým atmosférám s obsahem oxidu siřičitého [42], dle normy ČSN ISO 6988 - Kovové a jiné anorganické povlaky. Zkouška oxidem siřičitým s povšechnou kondenzací vlhkosti [30] a dle dřívějších výzkumů nalezených v literatuře [28] [31]. Koncentrace SO<sub>2</sub> byla zvolena 0,9 % při teplotě 40 °C. Jednotlivé cykly byly složeny z 16 hodin působení plynu a z 8 hodin působení běžných atmosférických podmínek se zvýšenou intenzitou cirkulace vzduchu (postupné vyfukování plynu z komory a vysoušení malt).

## 5.9 Mrazuvzdornost

Zkouška mrazuvzdornosti lehkých malt byla provedena na základě normy ČSN 72 2452 – Zkouška mrazuvzdornosti malty [43].

- *Podstata zkoušky:* Mrazuvzdornost malty se zkouší střídavým zmrazováním a rozmrazováním zkušebních těles nasycených vodou, a to buď na požadovaný počet zmrazovacích cyklů, nebo na stanovení stupně mrazuvzdornosti, přičemž se zjišťuje míra jejich porušení.
- *Zkušební zařízení:* Kromě zařízení na výrobu a následné mechanické či nedestruktivní zkoušení zkušebních těles je dále potřeba mrazící prostor s regulovatelnou teplotou do - 20 °C ± 3 °C takových rozměrů, aby zkušební tělesa vyplňovala nejvíce třetinu jeho objemu; vodní lázeň pro rozmrazování zkušebních těles s automatickou regulací teploty v rozmezí +15 až +20 °C takových rozměrů, aby zkušební tělesa vyplňovala nejvíce třetinu jeho objemu.
- *Zkušební postup:* Mrazuvzdornost se zkouší na zkušebních hranolech o rozměrech 40 × 40 × 160 mm z řádně zatvrdlé malty. Zhotoví se potřebný počet sad zkušebních těles, přičemž každá sada sestává ze tří těles. Zkušební tělesa se před zmrazováním změří a zváží a stanoví se u nich objemová hmotnost. Poté se tělesa nasycují vodou o teplotě + 15 °C až + 20 °C po dobu 24 hodin. Po nasycení vodou se hranoly ihned zmrazují. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se děje ve zmrazovacích cyklech. Jeden zmrazovací cyklus se skládá minimálně ze 4 hodin zmrazování a minimálně 2 hodin rozmrazování. Teplota mrazícího prostředí musí být v rozmezí - 15 °C až - 20 °C. Průběh realizovaných zmrazovacích cyklů je znázorněn na Obrázku 24.



Obrázek 24 - Zmrazovací cykly

Zkouška mrazuvzdornosti je ukončena po dosažení předepsaného počtu zmrazovacích cyklů, při zjištění poklesu pevnosti větší než 25 % nebo jsou-li zkušební tělesa zjevně mrazen porušena.

Jako výsledky zkoušky mrazuvzdornosti se uvádí zjištění úbytku hmotnosti zkoušených hranolů v procentech z počáteční hmotnosti, zjištění pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, zjištění změny dynamického modulu pružnosti a stanovení součinitele mrazuvzdornosti malty, který odpovídá poměru aritmetického průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu hranolů zmrazovaných k aritmetickému průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu hranolů porovnávací sady.

Malta se považuje za mrazuvzdornou pro dané zmrazovací cykly, při kterých úbytek pevnosti zmrazovaných vzorků k pevnostem porovnávacích vzorků není větší než 25 %. [43]

## 5.10 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé lehké malty

Objemová hmotnost zatvrdlé malty byla stanovena dle normy ČSN EN 12190 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt. [44]

- *Podstata zkoušky:* Uvedená norma popisuje postup pro stanovení objemové hmotnosti malty v ztvrdlém stavu.
- *Zkušební zařízení:* posuvné měřítko s minimální přesností 0,1 mm, váhy s rozsahem nejméně 1 kg a s minimální přesností 0,01 g.

- *Zkušební postup:* Objemová hmotnost se stanovuje na třech zkušebních hranolech. Zkušební hranol se zváží s přesností na 0,01 g. Objem zkušebního tělesa se vypočítá ze změřených rozměrů zkušebního tělesa. Objem je zaokrouhlen na čtyři platné číslice. Objemová hmotnost se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (14)$$

$\rho$  – objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>];

$W$  – hmotnost zkušebního tělesa [kg];

$V$  – objem zkušebního tělesa [m<sup>3</sup>]. [44]

## 5.11 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 196-1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. [45]

- *Podstata zkoušky:* Metoda určuje stanovení pevnosti v tlaku a případně pevnost v tahu za ohybu na zkušebních tělesech tvaru hranolu o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Pevnost v tahu za ohybu se zjišťuje pomocí třibodového zatěžování.
- *Zkušební zařízení:* Zkušební stroj pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu musí umožňovat zatěžování do 10 kN s přesností ± 1 % vynaloženého zatížení v horních 4/5 měřícího rozsahu při nárůstu zatížení (50 ± 10) N/s. Zkušební stroj musí být vybaven přípravkem pro zkoušení tahu za ohybu. Zkušební stroj pro stanovení pevnosti v tlaku musí mít vhodný pracovní rozsah pro zkoušení. Musí mít přesnost ± 1 % vynaloženého zatížení v horních 4/5 měřícího rozsahu. Musí zajišťovat možnost nárůstu zatížení (2400 ± 200) N/s a musí být vybaven ukazatelem míry zatížení. Dalším zkušebním zařízením je váha a posuvné měřidlo.
- *Zkušební postup:* Změřené a zvážené zkušební těleso se vloží do zkušebního stroje (hydraulického lisu) takovým způsobem, aby zatěžovaná plocha byla kolmá na směr hutnění. Po rozlomení tělesa se hodnota maximálního zatížení odečte na stupnici a zaznamená. Výpočet pevnosti v tahu za ohybu zkušebního tělesa popisuje následující vztah:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot h^2}$$

(15)

$R_f$  – pevnost v tahu za ohybu [MPa];

$b, h$  – rozměry průřezu hranolu [mm];

$F_f$  – zatížení vynaložené na střed hranolu při zlomení [N];

$l$  – vzdálenost mezi podporami (100 mm) [mm].

Výsledek je zaokrouhlen na nejbližší 0,1 MPa. [45]

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 12190 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt. [44]

Zkouška pevnosti v tlaku se provádí na zbylých polovinách zkušební tělesa z předchozí zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Poloviny tohoto tělesa se vloží do zkušební stroje tak, aby horní zatěžovaná plocha byla kolmá na směr hutnění. Míra maximálního zatížení při porušení se odečte na stupnici stroje a dle uvedené rovnice (16) se vypočte pevnost v tlaku. Výsledek se vyjádří s přesností na 0,1 MPa.

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

(16)

$R_c$  – pevnost v tlaku [MPa];

$F_c$  – nejvyšší zatížení vynaložené při porušení [N];

$A$  – zkoušená plocha o velikosti 1600 mm<sup>2</sup>. [44]

## 5.12 Nedestruktivní posouzení struktury - CT

Počítačová tomografie, označována zkratkou CT, je rentgenová diagnostická metoda, která zobrazuje strukturu daného vzorku v transversální rovině. Tato metoda využívá schopnosti absorpce rentgenového záření ve struktuře látky a následně matematicky vyjádří intenzitu absorpce. Jinými slovy se tedy hovoří o matematické rekonstrukci obrazu, která byla získána z několika řad rentgenových projekcí. Tyto projekce byly provedeny z různých úhlů a jsou dvojrozměrného charakteru. Spojením projekcí lze získat trojrozměrný obraz zkoumaného vzorku. [46]

Pomocí počítačové tomografie (jejíž terminologie, princip, postup a vyhodnocení jsou uvedeny v normách ČSN EN 16016-1 až 3 [47] [48] [49]) byla

nedestruktivně prozkoumána trojrozměrná vnitřní struktura vzorků malty jednotlivých receptur, s různou expozicí extrémních vlivů, jako je teplota a vysoká koncentrace SO<sub>2</sub>.

Pro zkoušku byl konkrétně použit tomograf phoenix v|tome|x m300 (viz Obrázek 25) od výrobce GE Sensing & Inspection Technologies, Německo. Tento typ tomografu se vyznačuje unikátním 300kV mikrofokálním rentgenovým zařízením v kompaktním ochranném kabinetu se žulovým ložem s vysoce přesným manipulačním systémem.



Obrázek 25 – Tomograf phoenix v|tome|x m300 od výrobce GE Sensing & Inspection Technologies (Centrum AdMaS)

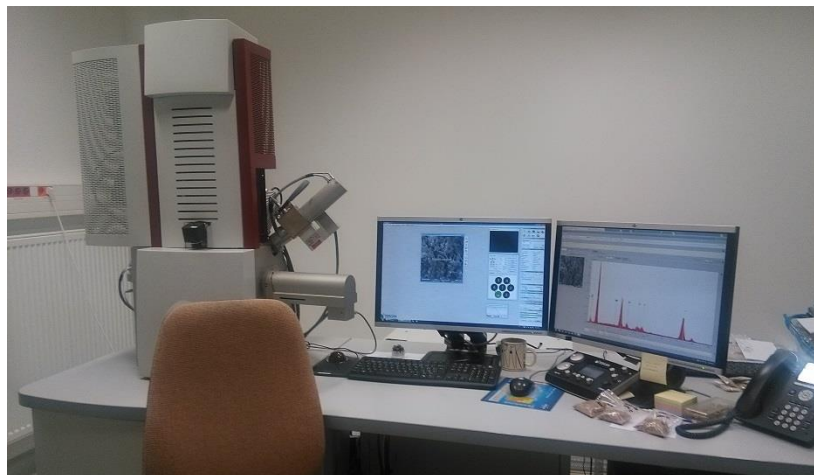
### 5.13 Analýza mikrostruktury - SEM

Elektronová mikroskopie slouží pro studium mikrostruktur v oblastech, kde již rozlišovací schopnost optické mikroskopie nestačí. Elektronová mikroskopie používá elektrony na rozdíl od optické mikroskopie, která používá pro zvětšení obrazu vzorku fotony.[50] Dle snímání obrazu a uspořádání se rozlišují dva druhy elektronové mikroskopie transmisní (TEM) a rastrovací (SEM).

Pro potřeby diplomové práce byla použita rastrovací mikroskopie, která je také nazývána skenovací či řádkovací. Od transmisní mikroskopie se liší tím, že svazek elektronů neprochází přímo vzorkem, ale dopadá na vzorek pod určitým úhlem. [51]. SEM vytváří zdánlivé trojrozměrné zobrazení sledovaného vzorku. Využívá proud elektronů pro skenování povrchu, které vyvolávají tvorbu sekundárních elektronů, odražených elektronů a absorbovaných elektronů.

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu je možné sledovat a charakterizovat heterogenní anorganické i organické materiály o rozměrech nm až  $\mu\text{m}$ . Obvyklé zvětšení získaných obrazů bývá 10 – 10 000 krát. Teoreticky je však možné dosáhnout až zvětšení 1 000 000 krát. Elektronový mikroskop se skládá ze zdroje elektronů, z kolony s elektromagnetickými čočkami, cívek pro rastrování elektronů na povrchu vzorku, komory se stolkem, na kterém je vzorek uchycen, vakuové pumpy, detektorů, které sbírají signály pro tvorbu obrazu na monitoru. [50]

Elektronovou mikroskopií se v rámci diplomové práce analyzovala mikrostruktura kompozitního systému lehkých malt. Mikrostruktura byla pozorována vždy u referenčních malt a dále i u malt vystavených teplotě 1000 °C. Pro zkoušku byl použit rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XMU (viz Obrázek 26), kde je proud elektronů tvořen Schottkyho autoemisní katodou.



Obrázek 26 - Elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XMU (Centrum AdMaS)

## 6 Použité suroviny

### 6.1 Pojivo

#### 6.1.1 Cement

Jako hlavní pojivovou složkou byl zvolen portlandský cement, který se vyznačuje hydraulickými vlastnostmi. Pro přípravu lehkých malt byl konkrétně použit cement CEM I 42,5 R od výrobce Českomoravský cement, a. s. – Závod Mokrý, který byl částečně nahrazen jemně mletou granulovanou vysokopecní struskou. Cement byl skladován v pytlích po 25 kg s polyethylenovou vložkou, zabraňující navlhání cementu v pytli. Výrobce ve svých technických listech garantuje obsah slínku 95 – 100 %, měrný povrch 374 m<sup>2</sup>/kg, pevnost v tlaku po 28 dnech 61 MPa, pevnost v tlaku po 90 dnech 67 MPa, pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech a po 90 dnech 9 MPa. Dále zde uvádí, že u výše uvedeného cementu lze očekávat rychlý nárůst pevností, vysokou počáteční pevnost, vysokou konečnou pevnost, rychlý vývin hydratačního tepla a vyšší celkové hydratační teplo. [52]

#### 6.1.2 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska vzniká jako vedlejší produkt při výrobě surového železa. Na povrchu surového železa se roztaví vápenec a další látky, které mají za cíl navázat na sebe složky způsobující znečištění a pokles jakosti surového železa. Roztavená struska na povrchu surového železa se prudce zchladí. Prudkým ochlazením vznikne granulovaná skelná (amorfní) fáze, která se vyznačuje latentně hydraulickými vlastnostmi. Tento proces se nazývá granulace strusky. Granulace může probíhat dvěma způsoby: vpouštění do vodní nádrže či přímé zkrápění strusky při vypouštění z pece. Granulát je nakonec semílán na specifický měrný povrch s hodnotou cca 300 m<sup>2</sup>/kg.

Požadavky na vysokopecní strusky jsou uvedeny v normě ČSN EN 197-1 - Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití [53]. Struska by měla být ze 2/3 hmotnosti sklovitá a při správném buzení vykazovat hydraulické vlastnosti. Musí obsahovat minimálně 2/3 hmotnosti CaO, MgO a SiO<sub>2</sub>, přičemž hmotnostní podíl (CaO + MgO) / SiO<sub>2</sub> musí být vyšší než 1. Zbývající 1/3 obsahuje Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a malé množství dalších látek. Jednotlivé procentuální zastoupení oxidů je závislé na druhu vyráběného železa, složení rudy, vápencového tavidla a množství koksu. Orientační procentuální zastoupení oxidů je v rozmezí: 30 - 50 % CaO, 28 -

38 % SiO<sub>2</sub>, 8 - 24 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1 - 18 % MgO, 1 - 2,5 % S<sup>-2</sup>, 1 - 3 % FeO a MnO, < 2 % Na<sub>2</sub>O a K<sub>2</sub>O, < 4 % TiO<sub>2</sub>.

Další významným hlediskem pro posouzení jakosti strusky je kromě chemického složení modul zásaditosti, který je znázorněn následující rovnicí:

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (17)$$

Pro strusky vhodné jako substituční složka do kompozitních systémů na bázi cementu je modul zásaditosti  $M_z > 1$ . [54]

V rámci diplomové práce byla použita velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska SMS 400 od výrobce Kotouč Štramberk, spol. s r.o., kterou lze dle výrobce aktivovat portlandským cementem, sádrrou, vápnem a roztoky alkalických sloučenin v závislosti na účelu použití. Strusku lze použít do maltových směsí, v silniční výstavbě, jako hydraulická složka v betonových směsích ke zvýšení konečných pevností a zvýšení odolnosti proti agresivnímu prostředí. Struska byla dodána v pytlích po 25 kg. Jemnost mletí dle Blaina se pohybuje okolo 415 m<sup>2</sup>/kg. Chemické složení vysokopecní strusky je uvedeno v následující Tabulce 4. [55]

*Tabulka 4 - Chemické složení vysokopecní strusky Štramberk*

Složky	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	K <sub>2</sub> O
% hm.	39,9	6,7	39,7	0,3	-	1,3	0,4

Vysokopecní struska byla vybrána na základě dřívějších výzkumů Lisztwanové [55] a Graclové [56], kde se prokázala jako surovina zlepšující odolnost vůči extrémním podmínkám.

### 6.1.3 Škvára Oslavany

Škvára vzniká při spalování různých druhů kamenného a hnědého uhlí, hořlavých břidlic a jiných pevných paliv. Jedná se tedy o zpevněné, nikoliv úplně roztavené, minerální zbytky pevných paliv. Škvára může vznikat na roštích a jiných topeništích. Pro použití škváry do cementového kompozitu je důležité brát zřetel na tyto vlastnosti, které značně ovlivňují jakost škváry:

- znečištění (jíloviny, odpadky atd.);



- jakost a druh výchozího paliva;
- způsob spalování;
- přítomnost nevyhořelých zbytků uhlí;
- obsah humusovitých látek;
- obsah volných oxidů vápníku a hořčíku;
- obsah sloučenin síry a způsob jejich vazby;
- obsah rozpustných solí;
- doba volného uložení škváry.

Nejdůležitějším sledovanou vlastností je druh výchozího paliva, množství a stav jeho zbytků ve škváře. Stavem paliva se rozumí jeho tzv. stupeň zkoksovatění nedopalu, přičemž v čisté hořlavině musí být obsah vodíku, dusíku, síry < 3 %, kyslíku < 1 % a uhlíku > 96 %.

Škvára, vzniklá spalovacím procesem hnědého uhlí, způsobuje svou objemovou nestálostí ve výrobcích rozpínání. Rozpínání je způsobeno nejen přítomností  $\text{Ca(OH)}_2$  v cementové matici, ale také špatnou odolností vůči povětrnosti a mrazu. Volný  $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$  nesmí být ve škváře přítomen, protože při jeho hašení dochází ke zvětšování objemu a tvorbě trhlin v utuhlé matici. Tento jev se nazývá tzv. vápenaté rozpínání, resp. hořečnaté rozpínání. Z tohoto důvodu je třeba uložit škváru alespoň na 6 měsíců na odvalech, kde se volné oxidy zhydratují a zkarbonatují. Při dlouhodobém uložení škvár se výrazně zlepšují jejich vlastnosti. Kromě hydratace volných oxidů zde dochází k vyluhování rozpustných solí, které v maltě způsobují výkvěty, a k oxidaci a vyluhování síry. Volné vápno je možné odstranit praním a dalším odležením na odvalech. Praním lze také odstranit sírany.

Dalším způsobem, jak zlepšit kvalitu škváry, je úprava její zrnitosti a třídění na sítěch. Tříděním se odstraní nejjemnější podíly, které obsahují většinu škodlivin, jako nedopaly a sloučeniny síry.

Škvára by se ve vodním výluhu neměla chovat ani zásaditě ani silně kysele. Přípustné pH se nachází v rozmezí 5 - 7,5 a nemělo by nijak ovlivňovat tuhnutí cementu.

Sypná hmotnost škváry se zrnitostí 0-16 mm by se měla pohybovat v rozmezí 400 - 1000  $\text{kg/m}^3$ . [57]

Oslavanská škvára byla zvolena jako alternativní příměs do směsi lehké malty. Tato škvára má hnědou barvu a hrubozrnnou strukturu. Škváru bylo třeba pomlít,

protože obsahovala hrubé sklovité částice. Mletí bylo provedeno v kulovém mlýně s rychlostí 49 otáček/min. Pro pomletí bylo naváženo 5 kg škváry a vysušeno. Po vysušení byla navážka vsypána do mlýna. Doba mletí odpovídala 30 minutám a doba vysypávání 10 minutám. Před použitím do maltové směsi byla škvára prosáta přes síto 0-1 mm. Dle Blaina byla stanovena jemnost mletí, která odpovídá hodnotě 387 m<sup>2</sup>/kg. Chemické složení Oslavanské škváry je uvedeno v Tabulce 5 a mineralogické složení v Tabulce 6.

*Tabulka 5 - Chemický rozbor Oslavanské škváry [58]*

<b>Složka</b>	<b>[% hmotnostní]</b>
SiO <sub>2</sub>	51,45
TiO <sub>2</sub>	0,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,32
MnO	0,106
MgO	1,76
CaO	3,8
Na <sub>2</sub> O	1,85
K <sub>2</sub> O	3,45
SO <sub>3</sub> celk.	0,97
SO <sub>3</sub> síran.	0,49
Cl <sup>-</sup>	0,007
Ztráta sušením	0,34
Ztráta žiháním 1100°C	2,38

*Tabulka 6 - Mineralogické složení Oslavanské škváry*

<b>Složky</b>	<b>Zastoupení [%]</b>
Skelná fáze	85
Spinel MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,63
Křemen SiO <sub>2</sub>	4,75
Hematit Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5
Mullit 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2 SiO <sub>2</sub>	7,4
Hemihydrát CaSO <sub>4</sub> · ½ H <sub>2</sub> O	1,6

Oslavanská škvára byla vybrána, jelikož na základě výsledků analýz byl očekáván její pozitivní vliv na teplotní odolnost i rezistenci vůči agresivním vlivům jakož i úspora primárních zdrojů (v důsledku omezení výroby cementu).

## 6.2 Mikrosilika

Jedná se o křemičité úlety vzniklé při výrobě FeSi nebo elementárního křemíku Si. Vyrábí se redukcí  $\text{SiO}_2$  v obloukové peci za teploty 2000 °C. Díky uhlíkovým částicím z elektrod má šedou až černou barvu. Je to pucolánově aktivní příměs, která s portlanditem  $\text{Ca(OH)}_2$  tvoří CSH (kalcium hydrosilikátové) gely. Obsahuje 85 až 97 % amorfního velmi reaktivního  $\text{SiO}_2$ . Velikost částic se pohybuje od 0,2 až do 2  $\mu\text{m}$ . Specifický povrch mikrosiliky je přibližně 20 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Vzhledem k vysoké jemnosti je mikrosilika schopna vyplnit veškeré prostory mezi cementovými zrny a vytvořit tak hutnější matici, která může zvýšit konečné pevnosti a zamezit propustnosti vody a korozivních látek. Kulatá zrna mikrosiliky zlepšují zpracovatelnost. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

Do směsi lehkých malt byla přidána železnato-vápenná mikrosilika, MICROSILICA-SIOXID od slovenské společnosti OFZ, a.s. Tato mikrosilika je vyráběna kondenzací výparů  $\text{SiO}_2$  v elektrické obloukové peci při výrobě FeSi. Dle technických listů [59] je specifická hmotnost rovna 220  $\text{kg}/\text{m}^3$ , měrný povrch 15 000 až 30 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Z hlediska chemického složení mikrosilika obsahuje min. 89 % Si, max. 2 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , max. 3 % CaO a MgO, max. 4 %  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{Na}_2\text{O}$  a ztrátu žháním max. 3 %.

Mikrosilika byla zvolena pro zlepšení teplotní odolnosti a rovněž trvanlivosti kompozitu v agresivním prostředí. V neposlední řadě byla do směsi přidána za účelem dostatečného zvýšení pevností, které byly sníženy prostřednictvím pórovitého kameniva.

## 6.3 Plnivo - kamenivo

### 6.3.1 Liapor (keramzit)

V České republice keramzit vyrábí firma LIAS Vintířov, LMS k. s. pod obchodním názvem Liapor.

Keramzit je uměle vyráběné lehké kamenivo zakulaceného tvaru. Vzniká ze snadno tavitelných hlín, které se vypálí na 1100 až 1200 °C a expandují na kuličky s pórovitou strukturou. Hlína vhodná pro výrobu keramzitu musí splňovat následující podmínky:

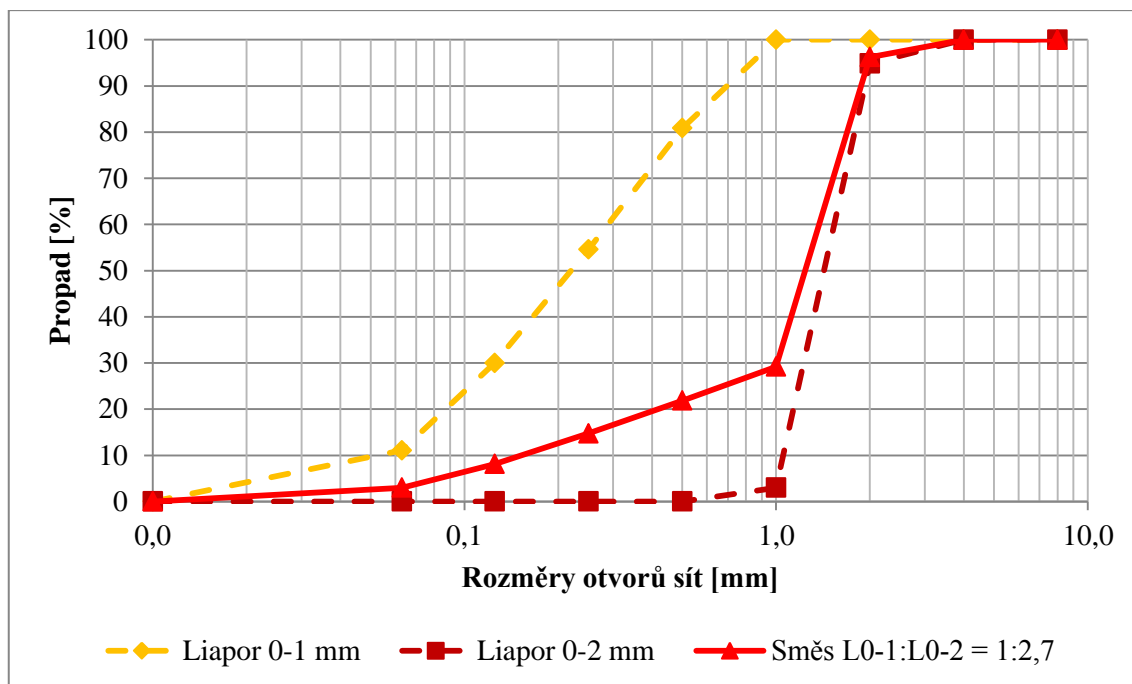
- při určité teplotě se v ní musí natavit tolik látky, aby zaplnila veškeré póry na povrchu, aby zabránila úniku plynů z nitra;
- při výpalu musí v ní nastat tzv. pyroplastický stav, který zajistí, aby se bubliny plynu uvnitř zrna nespojovaly a nevytvořily tak jeden velký pór;
- hlína musí obsahovat takové látky, aby v okamžiku pyroplastického stavu a slinutého povrchu zrna uvolňovaly plyny.

Kvalitní hlína by měla obsahovat oxidy železa, CaO, MgO a alkálie, přičemž obsah CaO by měl být  $< 5 \%$  a obsah oxidů železa v rozmezí 3 až 6 %. Plyny, které vznikají při výpalu a díky nimž je keramzit expandován, jsou především CO a O<sub>2</sub>, který vzniká redukcí Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. CO vzniká spalováním uhelnatých látek obsažených v hlíně. Pokud ovšem nejsou v hlíně přítomny, je nutno je přidat do směsi ve formě uhelnatého mouru, sazí, pilin, silně uhelnatých škvár a hnědého uhlí.

Hlína se ve formě plastického těsta formuje pomocí cihlářského pásmového lisu na jednotlivé válečky, které se zaprašují šamotem a řezou drátěným rotačním odřezávačem. Poté jsou válečky umístěny na rotační buben, kde dostanou svůj částečně kulový tvar. Dokonalý tvar je vytvořen až při samotném spalování.

Objemová hmotnost keramzitu ve volně sypaném stavu bývá 300 až 700 kg/m<sup>3</sup>, dle frakce. Nasákavost je 10 až 25 % a pevnost při stlačení ve válci 2,8 až 4 MPa. Keramzit obsahuje škodliviny, jako jsou například: 0,37 % SO<sub>3</sub>, 0,11 % S a vykazuje ztrátu žiháním 0,04 %. [57]

Pro výrobu lehké malty byl použit Liapor frakce 0-1 mm a frakce 0-2 mm. Dle technického listu se frakce 0-1 mm vyznačuje sypnou hmotností 650 kg/m<sup>3</sup> a objemovou hmotností 1900 kg/m<sup>3</sup>. Frakce 0-2 mm má sypnou hmotnost 620 kg/m<sup>3</sup> a objemovou hmotnost 1050 kg/m<sup>3</sup>. Na obou frakcích byly provedeny síťové rozbory, jejichž výsledky jsou uvedeny v Grafu 1. V grafu je také znázorněna třetí křivka zrnitosti, která znázorňuje směs obou frakcí v poměru 1 : 2,7 (0-1 : 0-2). Tento optimalizovaný poměr byl stanoven již na základě dřívějšího výzkumu Zaťkem [60]. Liapor byl, dle výzkumu Zaťka [60], před použitím do maltové směsi navlhčen na 21 % z hmotnosti kameniva, což představuje míru nasycení tohoto kameniva 84 %.



Graf 1 - Křivky zrnitosti Liaporu 0-1 mm, Liaporu 0-2 mm a jejich směsi v poměru 1 : 2,7

Kamenivo Liapor bylo vybráno pro svoji dobrou teplotní odolnost, která byla zkoumána v jedné z předchozích prací Vovesného [61] (viz Obrázek 27). Vovesný dokázal, že při teplotě 1266 °C dochází pouze k počátku mírného smršťování kameniva. Na základě tohoto zjištění lze předpokládat, že použitím Liaporu lze zvýšit teplotní odolnost celého kompozitu.



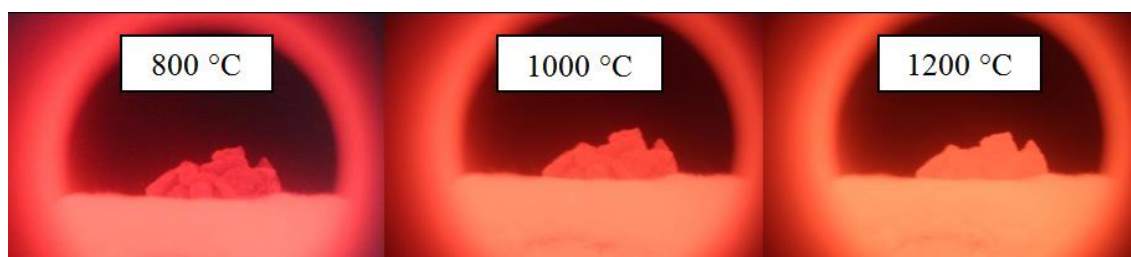
Obrázek 27 - Teplotní expozice Liaporu (uprostřed) při daných teplotách [61]

### 6.3.2 Popílkový agloporit

Agloporit představuje skupinu pórovitých kameniv, které jsou vyráběny slinováním krátkodobým výpalem na aglomeračních roštích. Suroviny pro výrobu agloporitu jsou především odpadními materiály z energetického a hutního průmyslu. Tzv. popílkový agloporit je umělé kamenivo, které se získává sbalkováním létavých popílků. Létavé popílků vznikají při spalování černého a hnědého uhlí. Sbalky se poté spékají na aglomeračním roštu, v šachtové peci nebo rotační peci při teplotě 1100 až 1250 °C.

Jako suroviny jsou především vhodné takové látky, které již obsahují určité množství hořlavin. Vsázku je tak možno pouze navlhčit vodou. Pokud suroviny neobsahují potřebné množství paliva, musí se tento obsah upravit až na potřebnou mez. Více obvyklé je však, že suroviny obsahují více uhelných látek než je potřeba. V takovémto případě jsou ke směsi přidávány jíly, haldoviny či jiné odpady. Minimální obsah uhelných látek se pohybuje okolo 5 % a maximální okolo 12,5 %, optimum okolo 9 %. Čím jemnější zrno spalitelných látek je, tím menší množství může být v sázce. Nedostatek paliva se projevuje špatným slinutím sbalku a vyšší množství vytváří spečence. Sbalkování probíhá na granulačním zařízení, v granulačním bubnu nebo na granulačním talíři.

Vlastnosti agloporitu závisí na druhu suroviny na způsobu jejich úpravy a na závěrečném drcení spečenců. Nadrcená zrna s otevřenými póry mohou zapříčinit vyšší spotřebu cementu. Barva agloporitu je na povrchové části hnědočervená a uvnitř šedá až šedočerná. Červené zbarvení na povrchu, kde difundoval kyslík, je způsobeno sloučením trojmocného železa. Pórovitost zrn agloporitu se pohybuje v rozmezí 40 až 65 %, mezerovitost 50 až 60 %. Objemová hmotnost u agloporitového písku je 600 až 1050 kg/m<sup>3</sup>, u frakcí štěrku 400 až 700 kg/m<sup>3</sup> a u podrceného 800 až 1350 kg/m<sup>3</sup>. Nasákavost odpovídá hodnotám 8 až 35 % z hmotnosti. Součinitel tepelné vodivosti je 0,12 až 0,16 (W·m)/K. Pevnost ve válci je 2 až 8 MPa. Obsah síry ve formě SO<sub>3</sub> by měl být < 1 %. Ztráta žíháním by neměla být > 5 %. Vzhledem k nízkému obsahu SiO<sub>2</sub> nepodléhá objemovým změnám při vyšších teplotách. [57] Tato vlastnost byla ověřena v rámci experimentu v pozorovací peci. Teplotní expozice je zobrazena na Obrázku 28 a 29.

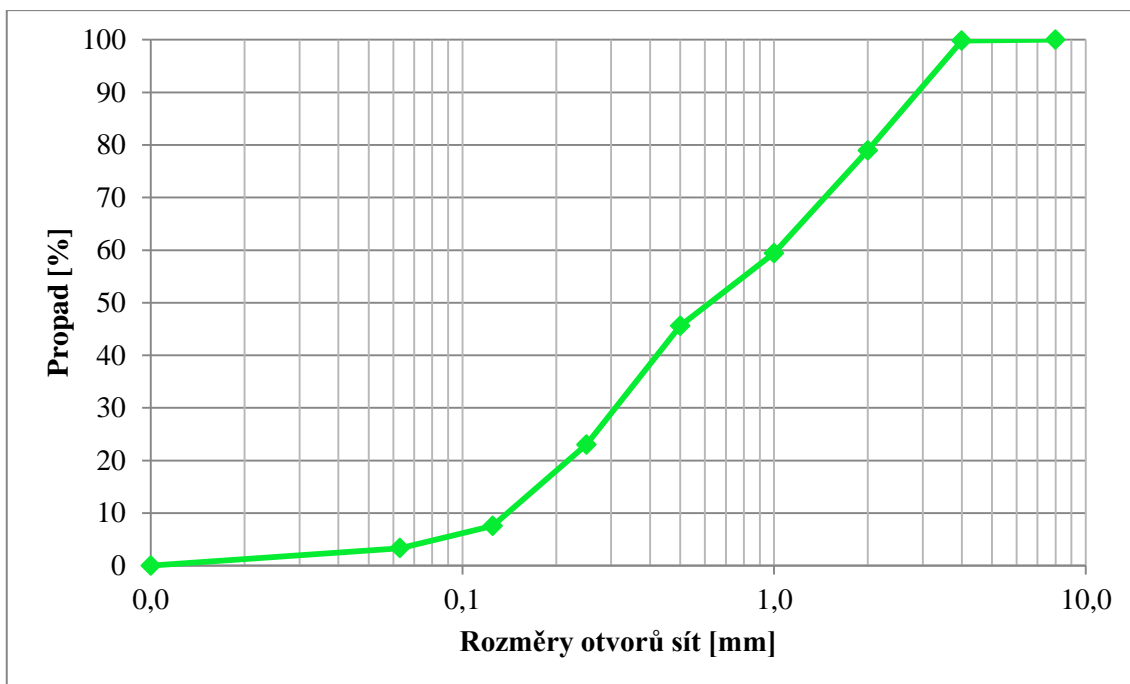


*Obrázek 28 - Zrna agloporitu frakce 1-4 mm v pozorovací peci*

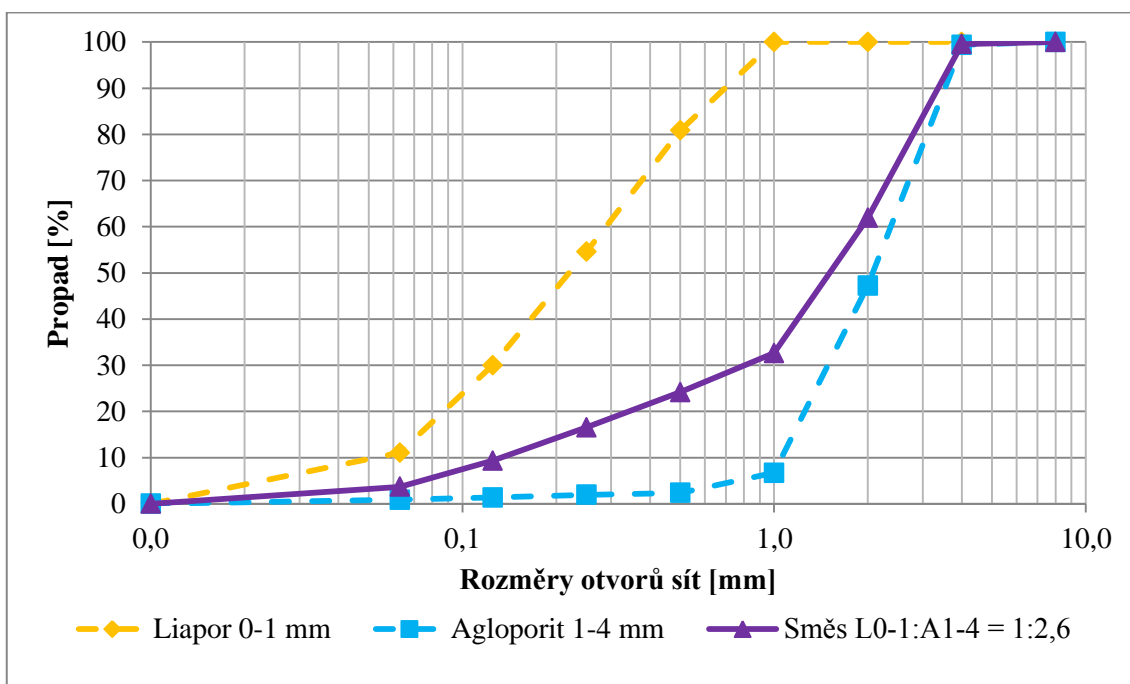


Obrázek 29 - Vzorek agloporitu frakce 1-4 mm vyjmutý z pozorovací pece (po expozici cca 1280 °C)

V rámci diplomové práce byl použit popílkový agloporit frakce 0-4 mm a 1-4 mm. Frakce 1-4 mm byla doplněna Liaporem frakce 0-1 mm. U agloporitu byla stanovena sypaná a objemová hmotnost. Sypaná hmotnost frakce 0-4 mm odpovídá hodnotě  $880 \text{ kg/m}^3$  a frakce 1-4 mm hodnotě  $620 \text{ kg/m}^3$ . Objemová hmotnost frakce 0-4 mm je rovna  $1780 \text{ kg/m}^3$  a frakce 1-4 mm  $1640 \text{ kg/m}^3$ . Dále byla pomocí síťového rozboru stanovena křivka zrnitosti obou frakcí, z nichž frakce 1-4 mm byla posléze upravována přidavkem Liaporu frakce 0-1 mm, aby bylo dosaženo optimálního stavu. Tento stav je charakterizován ideální křivkou zrnitosti, prostřednictvím níž můžeme docílit co největší hutnosti lehkých malt a současně co nejnižší mezerovitosti. Poměr agloporitu ku Liaporu byl na základě vlastního výzkumu, který je podrobně rozepsán v kapitole 9.1, stanoven na 1 : 2,6. Jednotlivé křivky zrnitosti jsou zobrazeny v Grafech 2 a 3 níže.



Graf 2 - Křivka zrnitosti agloritu 0-4 mm



Graf 3 - Křivky zrnitosti Liaporu 0-1 mm, agloritu 1-4 mm a jejich směsi v poměru 1 : 2,6

Jelikož se jednalo o pórovité kamenivo s vysokou nasákavostí, muselo být předem navlhčeno, aby nijak neovlivňovalo zpracovatelnost čerstvé malty a ostatní vlastnosti, jak bylo prokázáno např. v [13][14][15][16]. Na základě vlastního výzkumu, podrobně uvedeného v kapitole 9.1, byla nastavena vlhkost agloritu frakce 0-4 mm na 33 % z hmotnosti kameniva. Směs agloritu frakce 1-4 mm a Liaporu frakce 0-1 mm



byla vlhčena na 30 % z hmotnosti kameniva., s ohledem na různé rychlosti nasákavosti použitých pórovitých kameniv.

## **6.4 Celulózová vlákna**

Celulóza je vyráběna ze dřeva odstraněním dalších složek, konkrétně ligninu, hemicelulózy a dalších. Celulózu lze získat zpracováním přírodních materiálu nebo recyklací z papírenské výroby. [62]

Celulózová vlákna obsahují kromě celulózy různé množství ligninu, hemicelulózy, vody, proteinů, peptidů a anorganických sloučenin. Dle původu je můžeme rozdělit na dřevěná a nedřevěná. Dřevěná vlákna obsahují více ligninu než vlákna nedřevěná. Dále se celulózová vlákna rozdělují dle formy a to na vlákna o délce 20 až 100 cm, vlákna krátké délky tkané do příze a na buničinu, která je tvořena z velmi krátkých vláken o délce 1 až 10 mm. Buničina je nejvhodnější složkou pro použití do malt, protože ji lze snadno dispergovat ve vodě a je cenově dostupná. [60]

Celulózová vlákna se využívají do omítkových směsí pro renovace a rekonstrukce historických staveb a dříve se vlákna přidávala do sádrových omítek. Celulózová vlákna zlepšují mrazuvzdornost, snižují permeabilitu, snižují poškození mrazem a zvyšují vodotěsnost kompozitního systému. V neposlední řadě mohou celulózová vlákna způsobovat samo ošetřovací efekt, což znamená, že vlákna po zamíchání do čerstvé směsi nasají vodu, kterou později v průběhu tvrdnutí silikátového kompozitu uvolní. Nevýhodou celulózových vláken může být mírné zhoršení zpracovatelnosti malty. [62]

V diplomové práci byla použita vlákna z technické celulózy G-500T od firmy GREENCEL s.r.o., s obsahem celulózy 80 % a objemovou hmotností 50 až 100 g/l.

Vlákna z technické celulózy byla zvolena za předpokladu zvýšení celkové teplotní odolnosti kompozitu a snížení objemových změn během zrání malt. Toto bylo potvrzeno výzkumem Zařka [60], kde autor uvedl, že celulózová vlákna dosáhla při teplotní expozici mnohdy lepších výsledků než vlákna polypropylenová a že celulózová vlákna podstatně redukuje pokles pevností při teplotní expozici.

## **6.5 Polymerní přísada**

Jako polymerní modifikátor byl vybrán Vinnapas 4240 N. Tento bílý kopolymerní prášek je tvořen vinylacetátu a etylenu. Je snadno dispergovatelný ve vodě a vzhledem k vysokému obsahu etylenu má pružné vlastnosti. Neobsahuje organická

rozpouštědla, plastifikační přísady a ani látky tvořící povrchové filmy. Modifikátor zajišťuje velmi dobrou přilnavost malty k podkladu. [63] Jedná se o poměrně nový typ polymerního modifikátoru z řady Vinnapas, který je na tuzemském trhu nabízen krátce a byl doporučen zástupcem dodavatele jako přísada vykazující lepší vlastnosti, než starší typ Vinnapas 5043 N. Ověření tohoto polymerního modifikátoru ve vyvíjených maltách se tedy jeví jako velmi zajímavá a přínosná možnost.

## **6.6 Plastifikační přísada**

Plastifikační přísada byla do směsi přidána za účelem zlepšení zpracovatelnosti, snížení množství záměsové vody, tedy snížení vodního součinitele, a tím zvýšení konečných pevností. Pro experiment byla vybrána superplastifikační přísada Sika ViscoCrete – 1035 CZ. Jedná se o nažloutlý vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů s pH cca 4,5, s obsahem  $\text{Cl}^- \leq 0,1 \%$ , s obsahem alkálií  $\leq 1 \%$  a s objemovou hmotností cca 1,06 kg/l. Doporučené dávkování je dle technického listu 0,2 – 1,7 % z hmotnosti cementu. [64]

## **6.7 Záměsová voda**

Jako záměsová voda byla použita pitná voda z vodovodního řádu, která splňuje veškeré požadavky uvedené v normě ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. [65]

## 7 Sestavení receptur

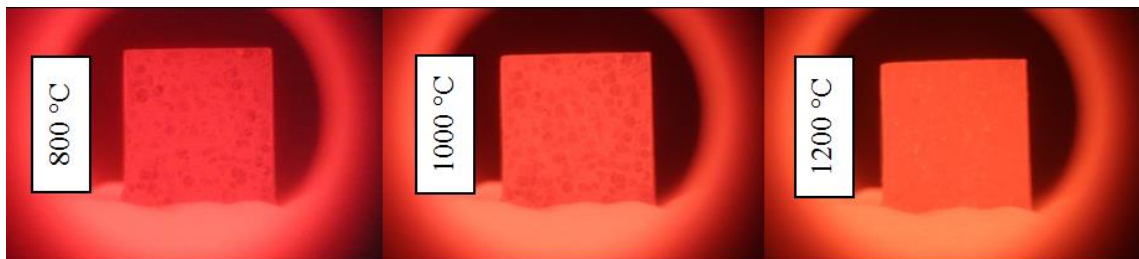
Na základě připravených primárních receptur v třetí etapě bylo zjištěno optimální množství a složení všech složek kompozitu. Pro sestavení optimalizovaných receptur ve čtvrté etapě byl rozhodující vliv kameniva, použitých alternativních příměsí a přísad.

### 7.1 Vliv kameniva

Do lehkých malt odolných extrémním podmínkám bylo použito lehké pórovité kamenivo zejména z důvodu docílení lepší odolnosti při extrémně vysokých teplotách.

Použitím agloporitu 0-4 mm bylo zjištěno, že kamenivo má dobré vlastnosti při teplotní expozici, avšak vlivem vyššího množství jemné frakce mírně zhoršuje zpracovatelnost čerstvé malty. Z tohoto důvodu bylo shledáno jako vhodné, že pro další receptury bude pro porovnání použito kamenivo Liapor (0-1 mm a 0-2 mm) a směs kameniva tvořená Liaporem (0-1 mm) a agloporitem (1-4 mm). Vhodným poměrem jednotlivých frakcí se lze co nejvíce přiblížit optimální křivce zrnitosti a dosáhnout tak maximální hutnosti a tedy i maximální pevnosti kompozitu.

Kombinace dvou frakcí kameniva Liapor byla vytvořena v poměru 1 : 2,7. Tento poměr, jak už bylo řečeno, byl stanoven na základě výzkumu prezentovaným Zaťkem [60], přičemž byla ověřena jeho odolnost vůči vysokým teplotám v pozorovací peci (viz Obrázek 30).



Obrázek 30 - Směs Liaporu 0-1 mm a Liaporu 0-2 mm v poměru 1 : 2,7, umístěná v pozorovací peci při zvyšující se teplotě

Optimální kombinace Liaporu a agloporitu byla zjišťována experimentálně a pomocí křivek zrnitosti podle Fullera, uvedených v kapitole 8.3 – Plnivo - kamenivo. Byly vytvořeny 4 receptury s poměry Liapor 0-1 mm : agloporit 1-4 mm = 1 : 2,2 a 1 : 2,6 a s poměry Liapor 0-1 mm : Liapor 0-2 mm : agloporit 1-4 mm = 1 : 1,4 : 1,4 a 1 : 1,4 : 2,5. Na základě stanovených fyzikálně-mechanických vlastností u jednotlivých

směsí bylo zjištěno, že nejlépe se jeví kombinaci představuje směs Liapor 0-1 mm : agloporit 1-4 mm v poměru 1 : 2,6.

Jelikož se jedná o pórovité kamenivo, je zřejmé, že má vyšší nasákavost než běžně používané hutné kamenivo. Vysoká míra nasákavosti může značně ovlivnit konzistenci čerstvé malty a také finální pevnosti. Proto je důležité ho předem saturovat vodou, aby se stalo inertní vůči odběru vody z čerstvé směsi.

Pro dosažení co nejlepších vlastností bylo ověřeno několik receptur s různou vlhkostí kameniva. U agloporitu 0-4 mm byly sledovány jednotlivé receptury s vlhkostí tohoto pórovitého kameniva v množství 20, 25, 30, 35 a 40 %. Směs obsahující agloporit se 40% vlhkostí měla sice vysoké pevnosti, ale při zkoušce na stříšacím stolku se lehce projevovala tzv. bleedingem. Dalšími v pořadí optimálními vlhkostmi se na základě provedených zkoušek jevíly 30 a 35%. Pro optimalizované receptury byla tedy hodnota vlhkosti agloporitu vstupujícího do směsi čerstvé malty upravena na 33 %.

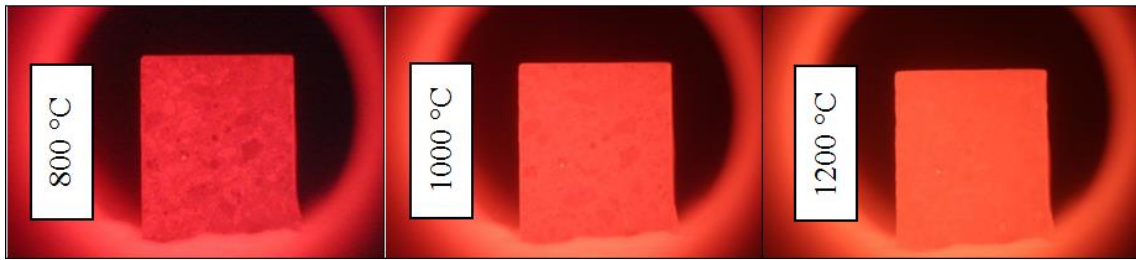
U směsi Liaporu byla vlhkost kameniva stanovena na 21 %. Tato vlhkost byla opět zjištěna z přechozích experimentů. [60] S ohledem na vlhkosti jednotlivých druhů kameniva se vlhkost směsi obou kameniv stanovila poměrem na 30 %.

V neposlední řadě byl zkoumán vliv dávky pojiva v poměru ke kamenivu. Pomocí pozorovací pece bylo zjištěno, že hmoty s poměrem množství matrice a kameniva 1 : 2,3 byly kvůli většímu obsahu pojiva náchylnější k teplotní expozici a více podléhaly negativním změnám za nižší teploty než v případě druhého zkoušeného poměru, tj. 1 : 2,5. Pro optimalizované receptury byl tedy vybrán poměr 1 : 2,5.

## 7.2 Vliv příměsí

Při navrhování nových stavebních materiálů a směsí je vždy snaha, aby při jeho výrobě byly náklady na materiál co nejnižší. Nízkých nákladů můžeme dosáhnout snížením množství cementu, který patří v maltě k nejdražším složkám systému. Nahrazením cementu alternativními surovinami (odpady) dosáhneme nejen nižší ceny, ale také lepších vlastností a vyšší trvanlivosti.

Ve třetí etapě bylo vytvořeno několik receptur s různými druhy alternativních příměsí a s různou procentuální náhradou cementu. Konkrétně byla vyzkoušena vysokopecní struska Štramperk, škvára Oslavany, popílek Dětmárovice a popílek Chvaletice. Vysokopecní struska byla zkoušena v množství 35 a 40 % objemově. Vyšší množství cementu ve směsi se projevilo nižší teplotní odolností. Tento vzorek umístěn v pozorovací peci při různých teplotách je zobrazen na Obrázku 31.



Obrázek 31 - Vzorek s 35% náhradou cementu vysokopecní struskou umístěný v pozorovací peci

Z tohoto důvodu byla pro další směsi zvolena 40% náhrada vysokopecní struskou jako základní receptura. Tato receptura byla dále upravována nahrazením strusky Štramberk, konkrétně 10, 15, 20 a 25 % objemu vysokopecní strusky dalšími příměsemi. Ze stanovených fyzikálně-mechanických vlastností a z chování jednotlivých směsí v pozorovací peci byla náhrada 20 % škváry z Oslavan vyhodnocena jako nejvýhodnější.

Pro zlepšení pevností byl do receptury lehké malty zahrnut navíc přídavek mikrosiliky, která svým velmi vysokým měrným povrchem vyplní veškeré prostory cementového tmelu. V rámci třetí etapy bylo odzkoušeno 7, 8, 9 a 10 % mikrosiliky. Pro optimalizované receptury byl zvolen 9% přídavek, který dostatečně zvýšil pevnosti a efektivně se podílel na zlepšení teplotní odolnosti testované malty.

### 7.3 Vliv přísad

Polymerní přísada byla do směsi přidána za účelem zvýšení přídržnosti a soudržnosti lehké malty. Vinnapas 4042 N byl vyzkoušen v množství 2 a 2,5 % (hmotnostní procenta vztažená na pojivo), z nichž 2,5% přídavek byl vybrán jako optimální. Starší typ Vinnapas 5043 N bylo třeba pro dosažení obdobných parametrů dávkovat v množství 3 %.

V dnešní době je takřka nemožné vyrábět cementové směsi bez přídavku plastifikační přísady. Použitím plastifikační přísady lze dosáhnout nižšího množství záměsové vody při stejné zpracovatelnosti. Zároveň je možné prostřednictvím přísady zvýšit konečné pevnosti a tudíž i trvanlivost kompozitu. Do směsi lehké malty byla zvolena plastifikační přísada Viscocrete 1035 od společnosti Sika v dávkách 0,65; 0,9; 1,1; 1,3 a 1,5 %. Na základě fyzikálně-mechanických vlastností byla do optimalizované receptury použita dávka 1,3 %. Při vyšší dávce plastifikační přísady, byla cementová matrice příliš hutná a mohla by v extrémních podmínkách popraskat vlivem krystalizačních tlaků. Dalším negativním jevem byla skutečnost, že vlastnosti hmoty

s dávkou plastifikační přísady ve vyšším množství se v čerstvém stavu znatelně zhoršily s ohledem na aplikační schopnosti této matly.

## 7.4 Optimalizované receptury

Výběrem vhodných složek v první a druhé etapě a jejich testováním v rámci třetí etapy bylo navrženo 6 receptur, jejichž optimální složení vykazovalo optimální vlastnosti pro navazující testování lehkých malt odolných extrémním podmínkám. Jednotlivé požadované vlastnosti byly dále testovány dle platných technických norem. Složení jednotlivých optimalizovaných receptur je uvedeno v Tabulce 7.

Tabulka 7 - Optimalizované receptury

Označení receptury	Dávkování v kg na m <sup>3</sup> směsi					
	AGŠ	AGO	LIŠ	LIO	ALŠ	ALO
Cement CEM I 42,5 R	387	387	387	387	387	387
Struska Štramberk	233	117	233	117	233	117
Škvára Oslavany	-	112	-	112	-	112
Mikrosilika (9 %)	58	58	58	58	58	58
Agloporit 0-4 mm	1231	1231	-	-	-	-
Agloporit 1-4 mm	-	-	-	-	801	801
Liapor 0-1 mm	-	-	305	305	357	357
Liapor 0-2 mm	-	-	455	455	-	-
Celulózová vlákna G-500T	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
Polymerní přísada Vinnapas 4042 N (2,5 %)	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
Plastifikační přísada (1,3 % z m <sub>c+s</sub> )	8,06	8,00	8,06	8,00	8,06	8,00
Voda	99,2	110,8	105,4	110,8	98,8	104,7
w [-]	0,16	0,18	0,17	0,18	0,16	0,17

## 8 Příprava zkušebních těles

V rámci experimentálních prací bylo sestaveno 6 receptur, které jsou uvedeny v Tabulce 7 předchozí kapitoly. Vždy jedna dvojice receptur obsahovala stejné kamenivo nebo stejnou kombinaci kameniv, a to pouze agloporit, pouze Liapor a kombinace Liaporu a agloporitu. Jednotlivé receptury ve dvojici se od sebe lišily složením pojiva. Tedy jedna receptura v sobě zahrnovala jak vysokopecní strusku, tak škváru z Oslavan v poměru 1 : 1, druhá obsahovala pouze vysokopecní strusku. Náhrada cementu alternativními surovinami byla vždy 40 % objemově.

### 8.1 Výroba zkušebních těles

Při výrobě zkušebních těles pro třetí a pátou etapu bylo postupováno vždy stejně podle následujícího postupu. Prvním krokem bylo předvlhčení kameniva určitým množstvím vody z hmotnosti kameniva pro dosažení stanovené vlhkosti, která byla na základě předchozích etap shledána jako optimální. Vlhčení probíhalo v průběhu 24 hodin před zamícháním kameniva do čerstvé malty.

Veškeré složky lehké malty se vážily na laboratorních vahách s přesností na 0,01 g. Míchání probíhalo v laboratorní míchačce o objemu cca 5 l. Veškeré suché suroviny kromě kameniva byly vsypány do míchačky a předem zhomogenizovány. Poté bylo přisypáno kamenivo a smícháno se suchou směsí. Nakonec byla přidána voda spolu s plastifikační přísadou. Kvůli plastifikační přísadě muselo být míchání mírně prodlouženo do doby, kdy byl účinek plastifikační přísady viditelný na konzistenci čerstvé malty. Konzistence malty byla stanovena, upravována a kontrolována pomocí střešacího stolku, kde se rozlité směsi pohybovalo okolo 180 mm.

Kromě velikosti rozlité byla také určena objemová hmotnost čerstvé malty, jejíž hodnota pro recepturu AGŠ byla rovna  $1750 \text{ kg/m}^3$ , pro AGO  $1760 \text{ kg/m}^3$ , pro LIŠ  $1530 \text{ kg/m}^3$ , pro LIO  $1540 \text{ kg/m}^3$ , pro ALŠ  $1740 \text{ kg/m}^3$  a pro ALO  $1760 \text{ kg/m}^3$ .

Množství pro jednorázové míchání odpovídalo vždy dvěma trojformám. Pro vytvoření těles byly použity ocelové trojformy s rozměry jednoho zkušebního tělesa tvaru hranolu o rozměrech  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ . Formy byly naplněny zhomogenizovanou směsí ve dvou vrstvách a zhutněny na vibračním stole. Doba míchání, plnění forem a hutnění nepřekročila 15 minut. Naplněné formy byly na 24 hodin přikryty vlhkou tkaninou a folií. Druhý den byla zkušební tělesa vyjmuta z forem a následně vložena do nosičů, které byly po dobu dalších 2 dnů přikryty vlhkou

tkaninou a fólií. Po odkrytí tělesa zrála na vzduchu v laboratorních podmínkách při teplotě cca 22 °C a relativní vlhkosti přibližně 50 % po dobu 28 a 90 dní. Pro každou recepturu bylo vytvořeno 16 sad po 3 zkušebních tělesech.

Naplňené formy a vybrané sady zkušebních těles umístěné v nosičích jsou zachyceny na následujících obrázcích (viz Obrázek 32 a 33).



*Obrázek 32 - Naplněné formy*



*Obrázek 33 - Vzorky umístěné v nosičích*



## 8.2 Návrh podmínek pro působení agresivního plynu SO<sub>2</sub>

Působení agresivním plynem probíhalo v klimatizační komoře (Obrázek 34) na vzorcích po 28 dnech zrání v laboratorním prostředí při teplotě 22 °C. Zatěžování oxidem siřičitým probíhalo v cyklech, které sestávaly z 16 hodin intenzivního působení SO<sub>2</sub> na vzorky a z 8 hodin vyfukování agresivního plynu z komory, kdy probíhala v komoře intenzivní cirkulace vzduchu. Koncentrace oxidu siřičitého byla s ohledem na poznatky zjištěné v rámci teoretické části a požadavku na akceleraci průběhu degradačních jevů malt nastavena na 7,2 l/ objem komory (0,9 % = 9 ‰ = 9000 ppm), relativní vlhkost na téměř 100 % a teplota na 40 °C. V průběhu vyfukování se teplota a relativní vlhkost snižovaly až na teplotu a relativní vlhkost laboratorních podmínek. Vizualní změny byly zaznamenávány pomocí fotodokumentace cca po 10 cyklech, po dosažení 40 cyklů byly změny struktury povrchu monitorovány již přibližně každých 5 cyklů. Celkem bylo provedeno na vzorcích 60 uvedených cyklů.



Obrázek 34 - Vzorky ve zkušební komoře

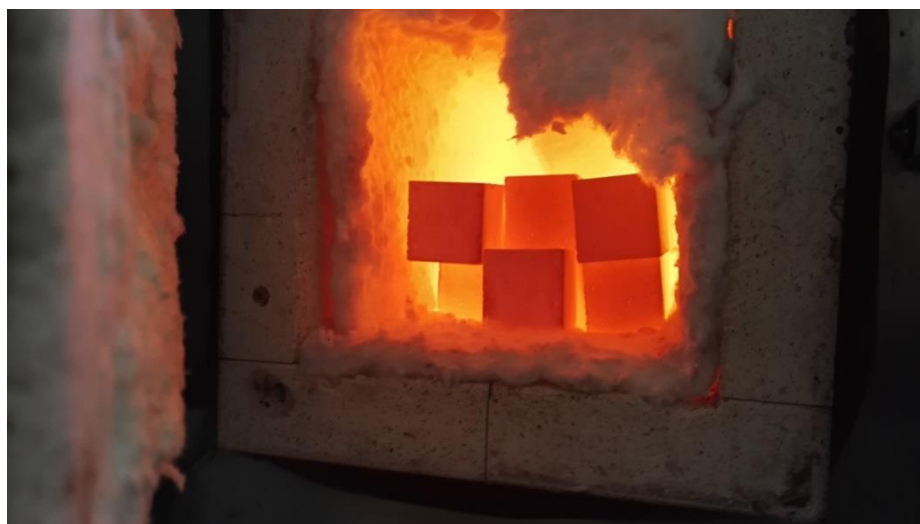
## 8.3 Návrh zmrazovacích cyklů

Zmrazovací cykly probíhaly dle technické normy ČSN 72 2452 – Zkouška mrazuvzdornosti malty. [43] Jeden zmrazovací cyklus byl tvořen ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování. Nejnižší teplota při mrazení je – 20 °C a teplota při rozmrazování je 20 °C. Vzorky vystavené zmrazovacím cyklům byly předem nasáknuty ve vodě po dobu 24 hodin. Za 1 týden bylo na vzorcích vykonáno 25 cyklů.

Celkem bylo provedeno 75 cyklů na 2 recepturách lehkých malt obsahující pouze agloporit a 100 cyklů na zbývajících 4 recepturách obsahující pouze Liapor a směs Liaporu a agloporitu.

#### 8.4 Návrh teplotních expozičních podmínek

Teplotní expoziční byly vystaveny vzorky po 28 dnech, vzorky po 90 dnech, vzorky po 90 dnech vystavené agresivnímu plynu a vzorky po 90 dnech vystavené zmrazovacím cyklům. Před umístěním vzorků do pece byly vzorky vysušeny v sušárně na 24 hodin na teplotu 105 °C, z důvodu odstranění přebytečné volné vody, která by mohla vést při rychlému nárůstu teploty k explozivnímu výparu. Výpal jednotlivých receptur probíhal v elektrické peci (Obrázek 35) na teplotu 600, 1000 a 1200 °C. Nárůst teploty byl stanoven na 10 °C/min, izotermická výdrž na maximální požadované teplotě trvala 90 min a pozvolné chlazení, cca 1 °C/min, nastalo po skončení teplotní výdrže a po vypnutí pece.



*Obrázek 35 - Zkušební vzorky umístěné v peci při teplotě 1000 °C*

Veškeré vypálené zkušební vzorky byly podrobeny testování objemové hmotnosti, objemových změn, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. V případě vybraných vzorků byla sledována nedestruktivně vnitřní struktura pomocí počítačové tomografie a dále mikrostruktura pomocí elektronového mikroskopu.

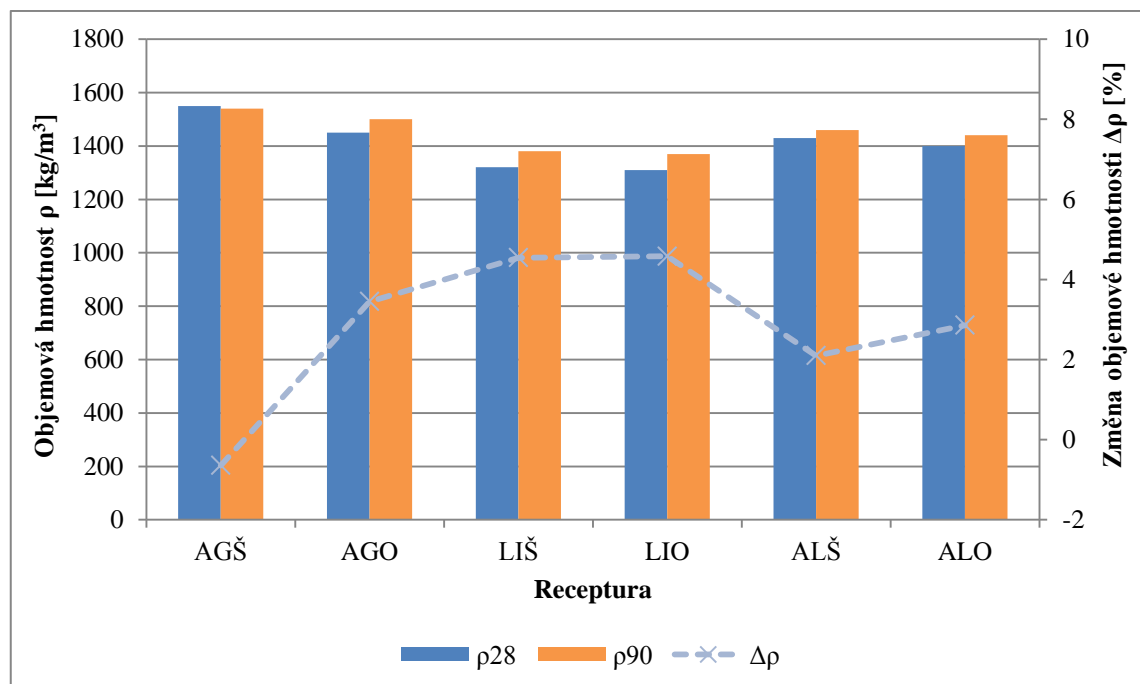
## 9 Výsledky a vyhodnocení

### 9.1 Vývoj vlastností v čase

Na základě fyzikálně-mechanických vlastností, jako jsou pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti v ztvrdlém stavu, byly porovnány jednotlivé referenční receptury. Referenčními recepturami se rozumí takové, které nebyly vystaveny žádnému agresivnímu prostředí a zrály za laboratorních podmínek po dobu 28 a 90 dnů.

#### 9.1.1 Objemová hmotnost

V následujícím Grafu 4 jsou zobrazeny nejen objemové hmotnosti jednotlivých malt, ale také vývoj těchto vlastností v čase.



Graf 4 - Objemové hmotnosti jednotlivých receptur po 28 a 90 dnech a jejich změna v čase

Nejvyšší objemovou hmotnost po 28 dnech zaujímala receptura AGŠ s hodnotou  $1550 \text{ kg/m}^3$  a nejnižší receptura LIO s hodnotou  $1310 \text{ kg/m}^3$ . Je tedy patrné, že malty s vyšším obsahem agloporitu mají vyšší objemové hmotnosti než malty obsahující pouze Liapor. Nejvyšší hodnoty objemových hmotností po 28 a 90 dnech u receptur AGŠ a AGO byly způsobené kamenivem agloporit 0-4 mm, které obsahovalo vyšší

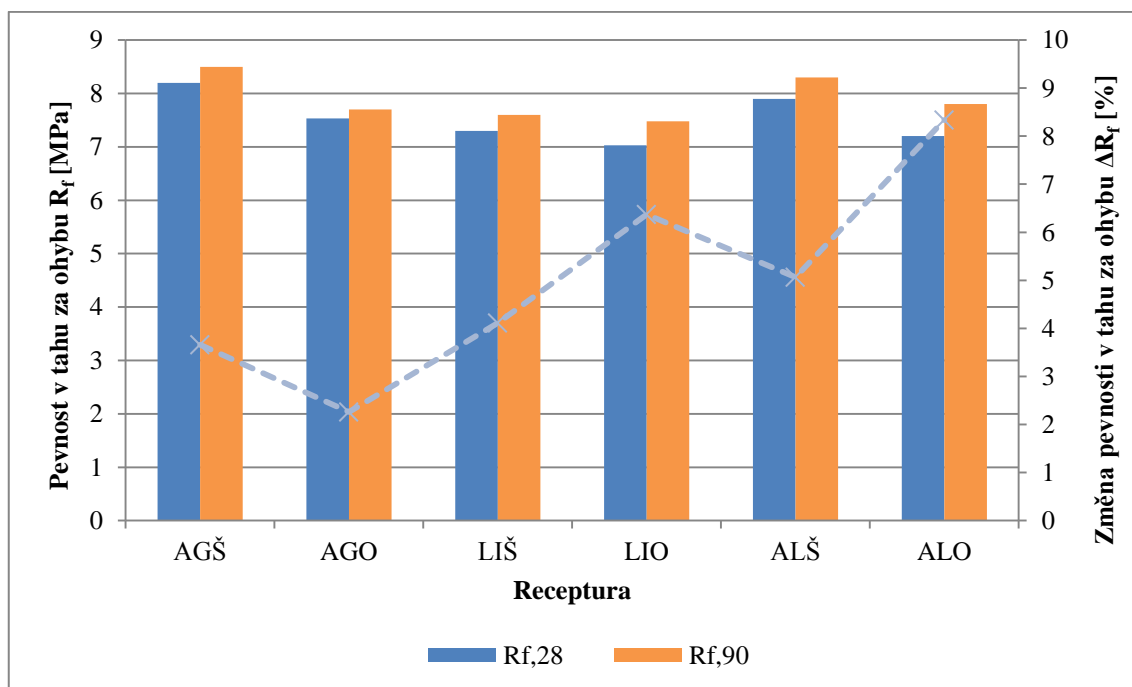
množství jemných částic. Jemná frakce vyplnila prostory ve struktuře cementové matrice a vytvořila tak hutnější matici.

Z hlediska časového vývoje všechny uvedené receptury, až na jednu výjimku u malty AGŠ, svoji objemovou hmotnost zvyšovaly v čase. Nejvyšší nárůst objemové hmotnosti byl vidět u receptury LIO a LIŠ, a to o 4,5 a 4,6 %. Naopak nejnižší nárůst měla malta ALŠ 2,1 %. Zvýšení objemové hmotnosti bylo pravděpodobně způsobeno zráním malty, tedy vysycháním vlhkosti a zvyšující se hutností.

Zajímavým poznatkem je, že objemová hmotnost receptur obsahující kombinaci škváry a vysokopecní strusky je vždy nižší než u směsí obsahující pouze vysokopecní strusku, tato skutečnost je způsobena především kvalitou a měrným povrchem obou uvedených strusek. Zatímco jemnost mletí u škváry se pohybuje okolo 387 m<sup>2</sup>/kg, měrný povrch strusky Štramberg je 415 m<sup>2</sup>/kg. Vyšší jemnost mletí vytvoří hutnější cementový tmel a tím zvýší jeho objemovou hmotnost.

### 9.1.2 Pevnost v tahu za ohybu

Další sledovanou vlastností byla pevnost v tahu za ohybu u zkušebních malt. V Grafu 5 jsou uvedeny pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých receptur a jejich vývoj v čase.



Graf 5 - Pevnosti v tahu za ohybu po 28 a 90 dnech jednotlivých receptur a jejich změna v čase

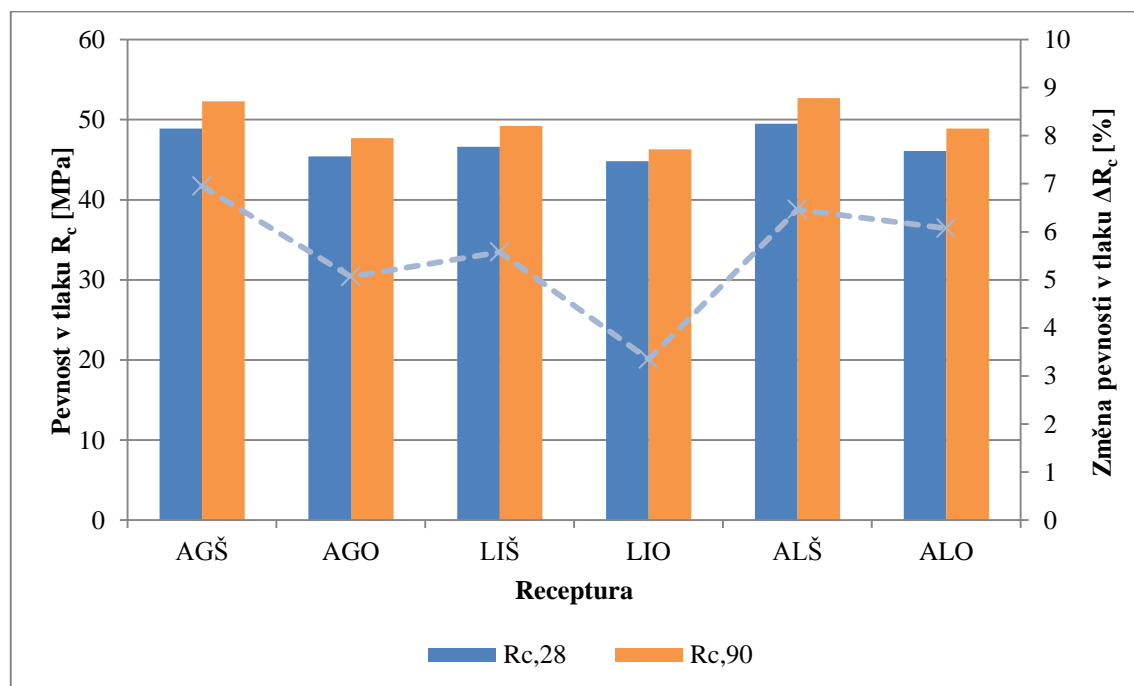
Stejně jako objemová hmotnost i pevnost v tahu za ohybu časem narůstá vlivem vysychání a vlivem hutnější struktury. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu vykazovala receptura AGŠ s hodnotou 8,2 MPa po 28 dnech a 8,5 MPa po 90 dnech. Nejnižší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu 7 MPa po 28 dnech a 7,5 MPa po 90 dnech měla malta s označením LIO. Rozdíl pevností je způsoben opět obsahem agloporitu, který má vzhledem ke svým ostrohranným zrnům s otevřenou pórovitostí lepší soudržnost s cementovým tmelem. Avšak agloporit se na rozdíl od Liaporu projevuje mírně horší zpracovatelností čerstvé malty při stejném obsahu vody.

Nárůst pevnosti v tahu za ohybu byl nejvýraznější u receptury ALO 8,3 % a nejnižší u receptury AGO 2,3 %.

Ačkoliv se objemová hmotnost u AGŠ časem mírně snížila, konkrétně o 0,6 %, tak na pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku neměla tato změna žádný vliv.

### 9.1.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku má podobný časový průběh jako pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost.



Graf 6 - Pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech jednotlivých receptur a jejich změna v čase

V Grafu 6 je patrné, že nejvyšší pevnost v tlaku měla malta ALŠ po 28 dnech 49,5 MPa a po 90 dnech 52,7 MPa. Nejnižší pevnost v tlaku byla určena u receptury LIO, a to 44,8 MPa po 28 dnech a 46,3 MPa po 90 dnech.

Nárůst pevnosti v tlaku byl nejvyšší u vzorku AGŠ 7 % a nejnižší u receptury LIO 3,3 %. Vyšší nárůst pevností v tlaku je vždy znatelný u směsí obsahující pouze vysokopecní strusku, která pravděpodobně dodatečně reaguje s ostatními složkami kompozitu na konečné hydratační produkty a tím se lépe zabuduje do struktury kompozitu.

Jak už bylo uvedeno, pevnost v tahu za ohybu byla nejvyšší u receptury AGŠ, oproti tomu nejvyšší pevnost v tlaku vykazovala směs ALŠ. Hrubá zrna agloporitu 0-4 mm obsažené v AGŠ sice zvyšují pevnost v tahu za ohybu lepší soudržností s matricí, ale jejich spolupůsobení s matricí má menší vliv na pevnost v tlaku. V tomto ohledu je pro pevnost v tlaku podstatnější zastoupení jednotlivých frakcí. Směs vytvořená v kombinaci Liaporu 0-1 a agloporitu 1-4 mm se svým složením více přibližuje optimální křivce zrnitosti, která se vyznačuje rovnoměrným zaplněním struktury kompozitu.

## **9.2 Vliv působení agresivního plynu a mrazu**

Jak už bylo řečeno, v rámci výzkumu byl, kromě dalšího, sledován vliv působení agresivního oxidu siřičitého a mrazu na lehkou maltu na bázi polymercementové matrice.

### **9.2.1 Vizuální posouzení u vzorků vystavených působení SO<sub>2</sub>**

Vzorky umístěné do zkušební komory s agresivním SO<sub>2</sub>, o koncentraci 0,9 %, byly pravidelně sledovány a zaznamenávány jejich průběžné změny. Při počátečním působení plynu se na povrchu malty začaly objevovat bílé mapy tvořené drobnými krystalky. Tyto krystalky se vlivem vlhkosti a dalšího přísunu agresivního plynu postupně zvětšovaly, až utvořily na povrchu bílý povlak, který byl pravděpodobně tvořen hemihydrátem siřičitanu vápenatého, hemihydrátem síranu vápenatého a dihydrátem síranu vápenatého. Detail výkvětu a krystalů je možno vidět na následujících Obrázcích 36 a 37.



*Obrázek 36 - Krystaly produktů sulfatace*

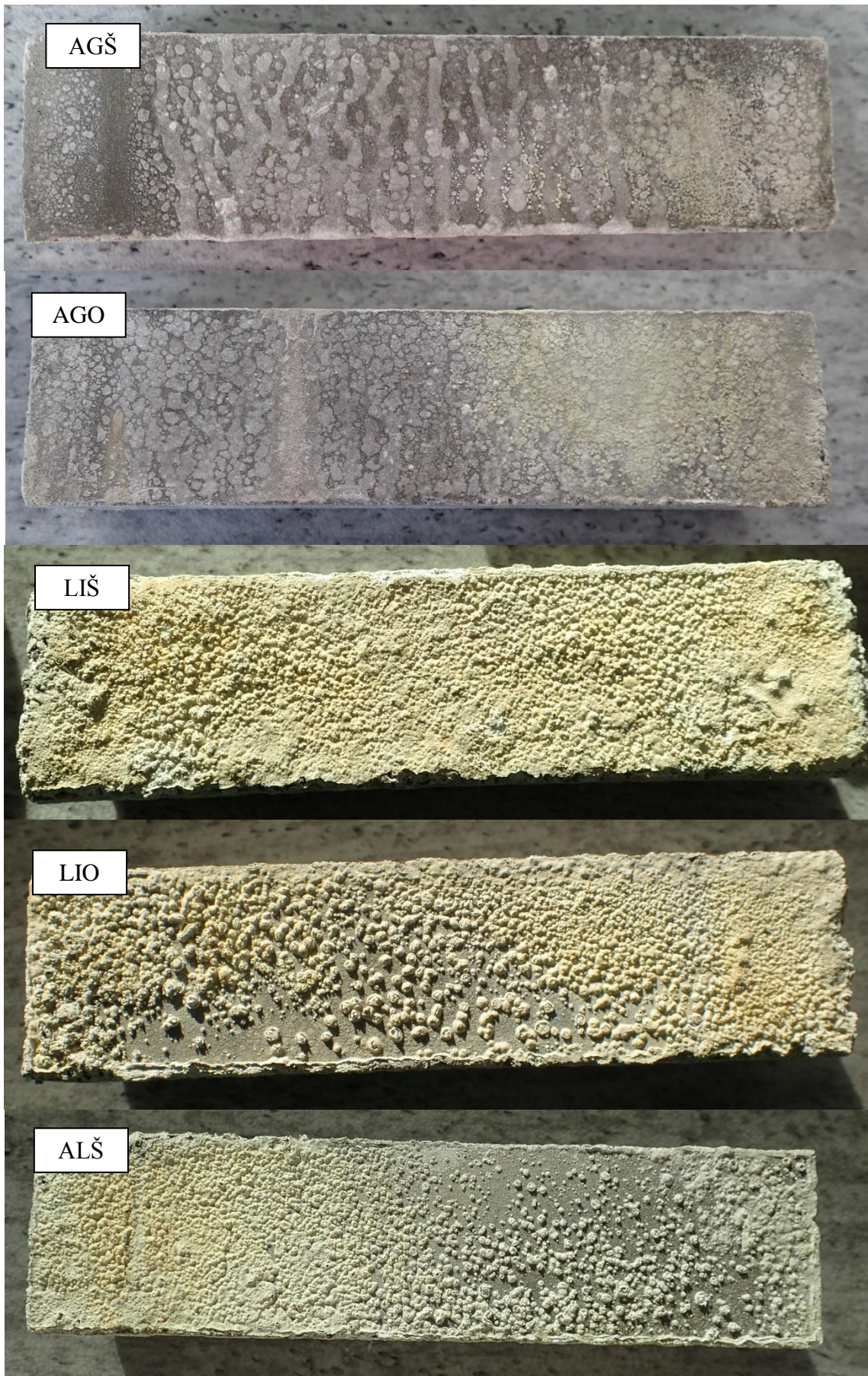


*Obrázek 37 - Detail výkvětu*

Tvorba výkvětů byla u každé receptury individuální, nejvíce se však projevovala u směsí obsahující pouze Liapor, tedy LIŠ a LIO. U zkušebních vzorků tvořených pouze Liaporem byl povrch více pórovitý, proto se mohl plyn společně s vlhkostí snadněji absorbovat a vytvořit tak větší množství krystalů na povrchu. Další zajímavým poznatkem je, že větší množství výkvětů se tvořilo na povrchu malt obsahující pouze vysokopecní strusku.

Konečné výkvěty utvořené na povrchu jednotlivých receptur po 60 cyklech jsou zobrazeny na Obrázku 38.





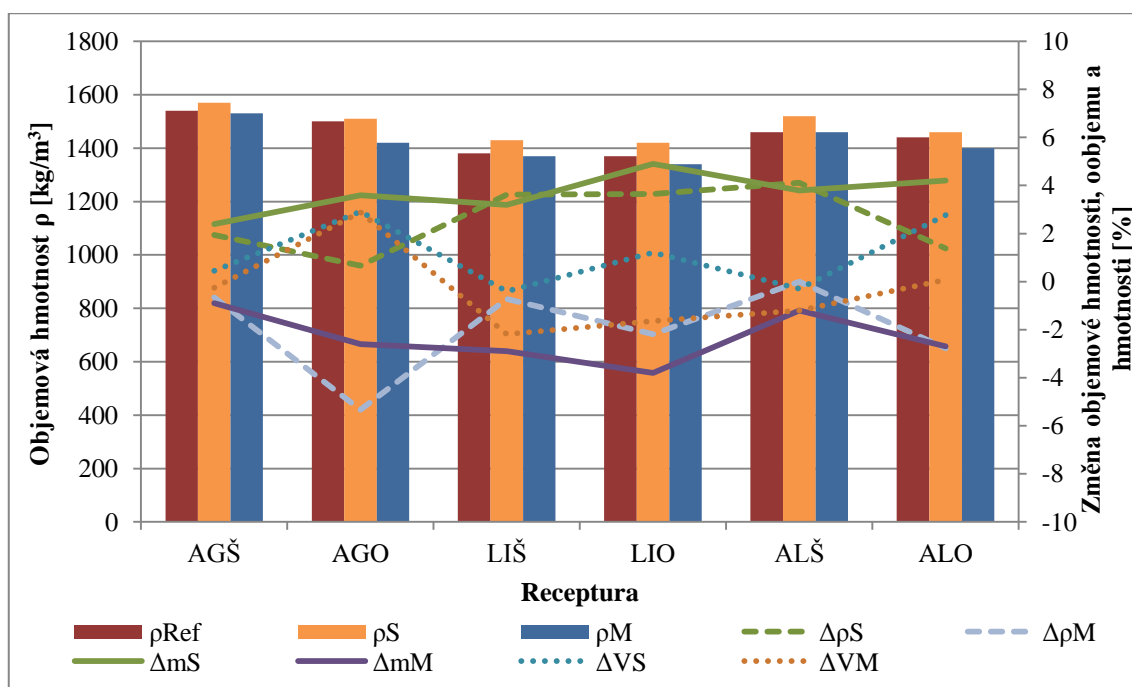




Obrázek 38 - Výkvěty vytvořené při působení agresivního plynu  $SO_2$  a vlhkosti

### 9.2.2 Objemová hmotnost

Stejně jako vlivem mrazu tak i vlivem sulfatace vznikají ve struktuře novotvary vyznačující se zvětšeným objem. Při jejich vytváření působí na matici krystalický tlak, který může strukturu kompozitu narušit a ovlivnit tak výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti. U počáteční sulfatace lze ovšem očekávat i například zvýšení pevnosti či objemových hmotností.



Graf 7 - Objemová hmotnost vzorků vystavených mrazu a agresivnímu plynu  $SO_2$ , změna hmotnosti, objemu a objemové hmotnosti vlivem mrazu a vlivem  $SO_2$

Z Grafu 7 je patrné, že vlivem působení agresivního plynu oxidu siřičitého se objemová hmotnost mírně zvyšovala. Nejzásadnější růst objemové hmotnosti byl viditelný u receptury ALŠ o 4,1 %. Nárůst hmotnosti a objemové hmotnosti byl

způsoben obsahem nově vzniklých produktů sulfatace, které vyplnily póry ve struktuře a pokryly povrch malty ve formě výkvětů.

Ačkoliv receptura LIO zvýšila svoji objemovou hmotnost pouze o 3,6 %, tak změna v hmotnosti byla nejvyšší o 4,9 %. Jak už bylo zmíněno receptura obsahující Liapor má o něco více pórovitou strukturu, a proto zde snadněji vznikají krystaly produktů sulfatace.

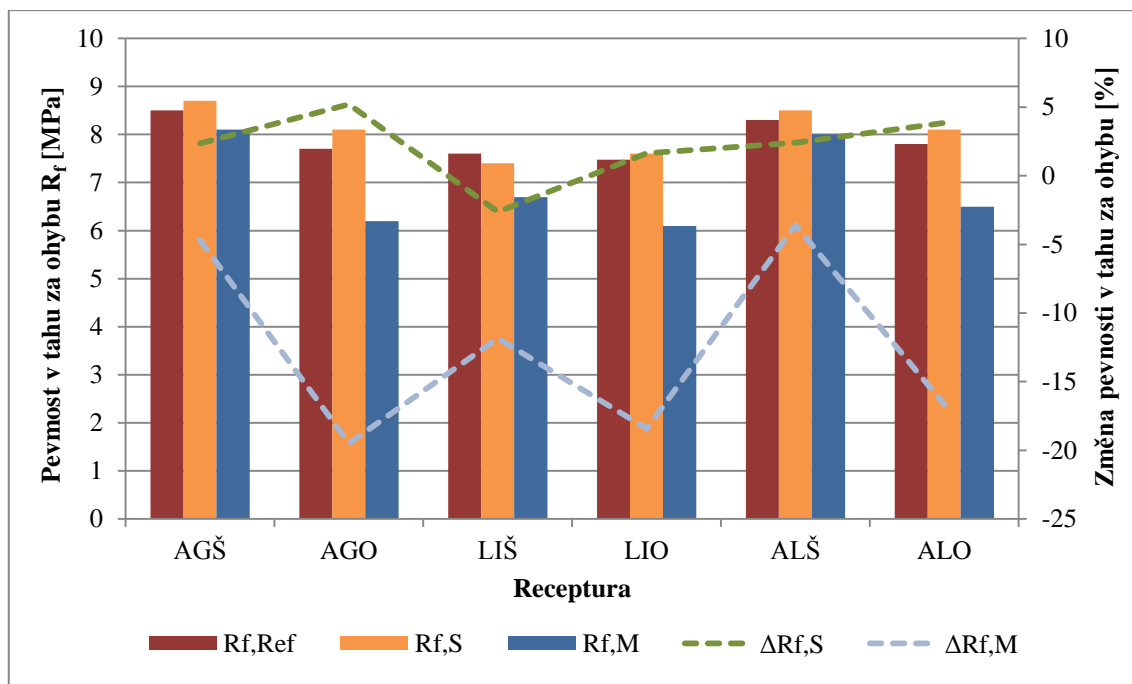
Toto tvrzení platí i pro receptury obsahující škváru, u nichž je struktura s největší pravděpodobností více propustná pro plyny. Vyšší propustnost je patrně způsobena nejen škvárou s menším měrným povrchem než má vysokopecní struska, ale také mírně vyšším vodním součinitelem.

Nejmenší změna objemové hmotnosti a hmotnosti byla zaznamenána u receptury AGŠ a AGO, které se vyznačují největší hutností, která brání průniku plynu do struktury.

Z hlediska mrazu byla ovšem závislost opačná. Při působení mrazu se objemová hmotnost ve většině případů snižovala, kromě receptury ALŠ, kde objemová hmotnost zůstala stejná. Stejně jako objemová hmotnost, tak i hmotnost se snižovala po působení zmrazovacích cyklů. Největší změna byla pozorována u vzorku AGO, kde se objemová hmotnost snížila o 5,3 %, a u vzorku LIO, kde hmotnost poklesla o 3,8 %. Nejmenší změna hmotnosti byla u receptury AGŠ, o 0,9 %.

### **9.2.3 Pevnost v tahu za ohybu**

Vlivem sulfatace se zpočátku zvyšuje nejen objemová hmotnost, ale i ostatní fyzikálně-mechanické vlastnosti, jako je například pevnost v tahu za ohybu. Působením agresivního plynu oxidu siřičitého vznikají těsně pod povrchem malty nové produkty, které zvyšují její mikrotvrdot. Tuto zvýšenou mikrotvrdot je možno dokázat následujícím Grafem 8, který zobrazuje pevnost v tahu za ohybu.



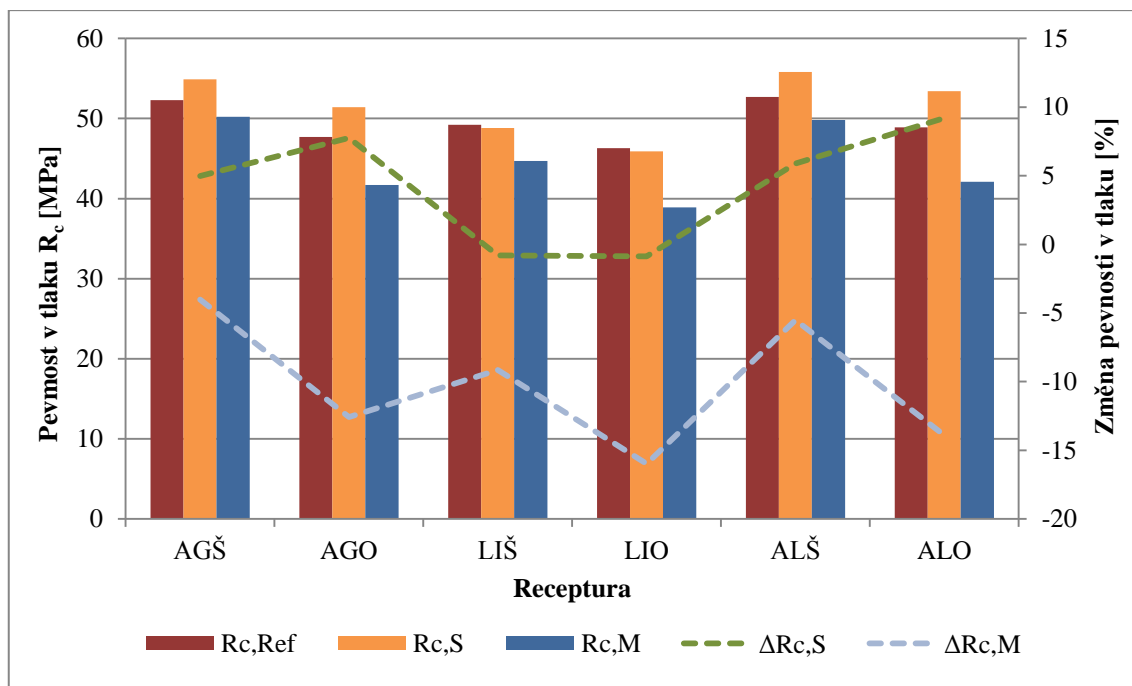
Graf 8 – Pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých receptur a jejich změna při působení mrazu a agresivního plynu  $SO_2$

Bylo potvrzeno, že působením oxidu siřičitého na cementovou matici se pevnost v tahu za ohybu, kromě receptury LIŠ, zvyšovala. Nejvyšší nárůst vykazovala receptura AGO o 5,2 %. Pevnost malty s označením LIŠ klesla o 2,6 %. Tento pokles byl zapříčiněn působením novotvarů sulfatace, které pravděpodobně svým zvětšeným objemem narušily soudržnost kameniva s cementovým tmelem.

Zmrazovacími cykly se pevnost v tahu za ohybu snižovala, nejvíce u receptury AGO o 19,5 % a u receptury LIO o 18,4 %. Nejnižší pokles byl zaznamenán u malty obsahující pouze kombinaci agloporitu a Liaporu ALŠ o 3,6 %. S ohledem na výsledné poklesy, které jsou  $< 25$  %, ohybových pevností lze zkonstatovat, že všechny uvedené receptury jsou mrazuvzdorné.

#### 9.2.4 Pevnost v tlaku

Další pozorovanou vlastností byla pevnost v tlaku. Výsledky zkoušek jsou zaznamenány v Grafu 9.



Graf 9 - Pevnost v tlaku jednotlivých receptur a jejich změna při působení mrazu a agresivního plynu  $SO_2$

Pevnost v tlaku se u většiny testovaných receptur, na které působil oxid siřičitý, zvětšovala, nejvíce u receptury ALO o 9,2 % a nejméně u AGŠ o 5 %. U vzorků LIŠ a LIO byl vyzorován pokles pevností v tlaku o 0,8 a 0,9 %. Stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu, tak i zde platí, že zvýšení pevnosti bylo pravděpodobně způsobené produkty sulfatace, které vyplnily volné prostory kompozitu. Receptura obsahující pouze keramzit se jako jediná vyznačovala poklesem pevností, kdy byl zároveň patrný nárůst objemové hmotnosti, což nasvědčuje, že síranové produkty již neměly prostor k dalšímu rozpínání a pomalu začala degradace struktury malt LIO a LIŠ. S ohledem na rozdílnost použitého kameniva se lze domnívat, že snížení pevnosti v tlaku způsobila narušená soudržnost kameniva a matrice, kdy lze poukázat na lepší pojivové vlastnosti agloporitu s matricí a jeho otevřenější strukturu i na povrchu zrn.

Zajímavým poznatkem je, že přes negativní projevy na povrchu malt obsahující pouze vysokopepnicí strusku se jejich hmota chovala jinak, což je dáno procesy ve vnitřní struktuře kompozitu, která není při vizuálním posouzení patrná.

U veškerých vzorků podrobených zkouškám mrazuvzdornosti se pevnost v tlaku snížila. Největší pokles vykazovala receptura LIO o 16 % a nejnižší směs AGŠ o 4 %. Příčinou poklesu byly poruchy ve struktuře. Při zmrazování vznikl z obsažené volné vody ve struktuře led, který narůstal a vytvářel krystalický tlak, který zapříčinil vznik

poruch a následné snížení pevností, jak v tahu za ohybu, tak v tlaku. Vzhledem k průběhům uvedeným v grafech výše je nutné poukázat na nižší počet zmrazovacích cyklů v případě receptury AGŠ a AGO, z čehož je patrné, že by ještě při další sadě (25) cyklů došlo ke zhoršení parametrů, a receptura AGO by s největší pravděpodobností dosahovala nejhorších výsledků.

### **9.3 Teplotní expozice malt**

Nejpodstatnější částí experimentu byla teplotní expozice malt navržených receptur po 28 dnech, 90 dnech, vystavených agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> a podrobených zkoušce mrazuvzdornosti. Receptury byly vystaveny teplotám 22, 600, 1000 a 1200 °C a poté byly u nich sledovány změny chování v důsledku působení těchto vysokých teplot, konkrétně pak vizuální změny, změny fyzikálně-mechanických vlastností změny ve struktuře a mikrostruktuře kompozitu.

#### **9.3.1 Vizuální posouzení**

Lehké malty na bázi cementové matrice postupně mění vlivem stoupajících teplot svoji barvu. Barevné přechody jsou nejen závislé na teplotě, ale také na složení dané malty a na chemických procesech probíhajících uvnitř struktury kompozitu při dané teplotě.

V průběhu výzkumu byly pomocí fotodokumentace (Obrázky 39 až 41) zaznamenávány barevné změny vybraných receptur vystavených různému prostředí a různým teplotám.



Obrázek 39 - Receptura AGŠ ve stáří 90 dní po vystavení nepříznivým vlivům vč. teplotní expozice



Obrázek 40 - Receptura LIS ve stáří 90 dní po vystavení nepříznivým vlivům vč. teplotní expozice





Obrázek 41 - Receptura ALŠ ve stáří 90 dní po vystavení nepříznivým vlivům vč. teplotní expozice

U referenčních malt a malt vystavených zmrazovacím cyklům se barevné přechody (které souvisí mimo jiné se změnami mineralogického či chemického složení) způsobené teplotou příliš nelišily. Na barevné změny neměl vliv ani obsah škváry či různé druhy kameniva.

U vzorků vystavených agresivnímu plynu se však barevný odstín poněkud liší. Toto je způsobené obsahem síranových produktů sulfatace, které se vlivem teploty rozkládají a mění barvu cementového tmele.

Ve struktuře malt vypálených v elektrické peci na 600 °C došlo postupně v průběhu zvyšování teploty k odpaření volné a fyzikálně vázané vody, k dehydrataci cementového gelu, k rozkladu sádrovce, k rozkladu portlanditu, k rozkladu CSH gelů a k tvorbě tzv.  $\beta$  -  $C_2S$  belitu. Všechny tyto chemické procesy vedly nejen ke změně vnitřní struktury, ale také k zesvětlení barevného odstínu malty. Za těchto teplot nebyly zaznamenány jakékoliv trhlinky a deformace zkušebních těles.

Barevná změna vytvořená na vzorcích malt vypálených na 1000 °C byla způsobena, kromě předešlých reakcí, rozkladem CSH hydratačních produktů a především rozkladem uhličitánů na oxid vápenatý a oxid uhličitý. Se zvyšující se teplotou dostává matrice nažloutlý odstín.

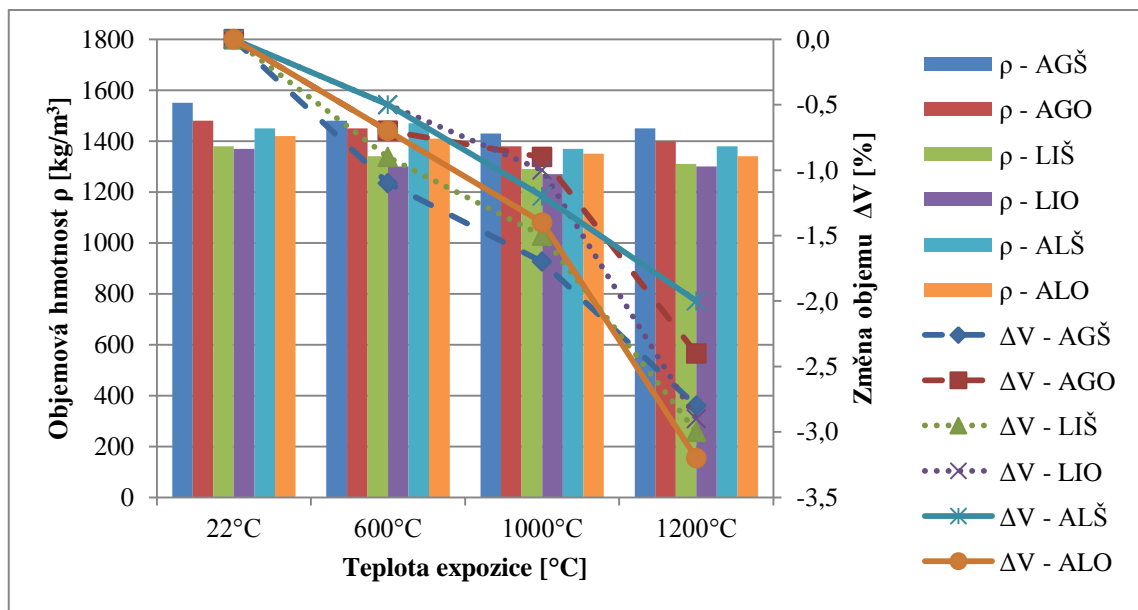
Vzorky vystavené sulfataci měly oproti ostatním vzorků načervenalý odstín, který byl vytvořen některým z produktů rozkladu. Kromě uvedených rozkladů, proběhly

v degradované maltě další chemické reakce, jako byly rozklad ettringitu, rozklad monosulfátu a rozklad siřičitanů a síranů na konečný oxid vápenatý. Vlivem objemových změn při rozkladu síranových produktů byla struktura mírně porušena mikrotrhlinkami.

Při působení 1200 °C se barevný odstín změnil do okrové barvy. Některé složky cementového tmele pravděpodobně změnily svoje vazby z hydraulických, na keramické. U některých zkušebních těles, především těch, které byly vystaveny agresivnímu plynu, byla viditelná drobná deformace tvaru a trhlinky.

### 9.3.2 Objemová hmotnost a objemové změny

Kromě barevné změny se působením vysoké teploty mění i jiné vlastnosti, jako je například objemová hmotnost. V následujících Grafech 10 až 13 jsou ukázány objemové hmotnosti a změna objemu po teplotní expozici u vzorků stáří 28 dní, stáří 90 dní, vystavených mrazu a vystavených agresivního plynu SO<sub>2</sub>.

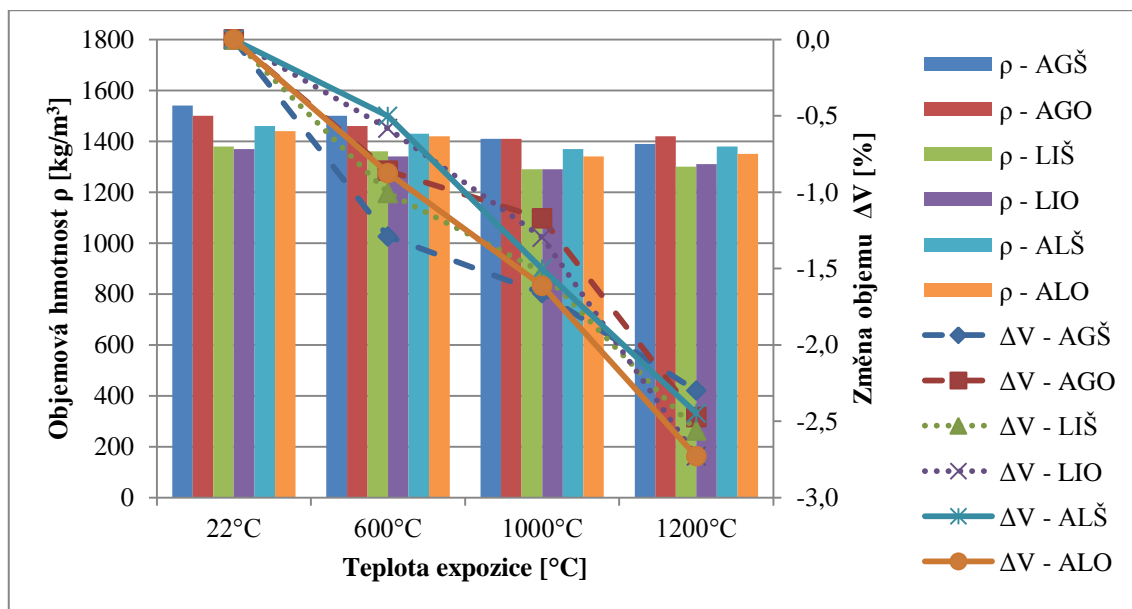


Graf 10 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u referenčních malt stáří 28 dní

Obecně je zřejmé, že se zvyšující se teplotou vznikají rozkladem látek dutiny a kapiláry, které podstatně snižují objemovou hmotnost lehkých malt. Snižování probíhá u některých vzorků po určitou mez, poté se objemová hmotnost vlivem slinování a tavení opět zvyšuje. Je tedy patrné, že nejvyšší objemová změna nastává při teplotách 1000 °C, kdy většina složek cementového tmele podlehla rozkladu. Co se týče objemu vzorku, tak ten je také vlivem vzrůstající teploty snižován.



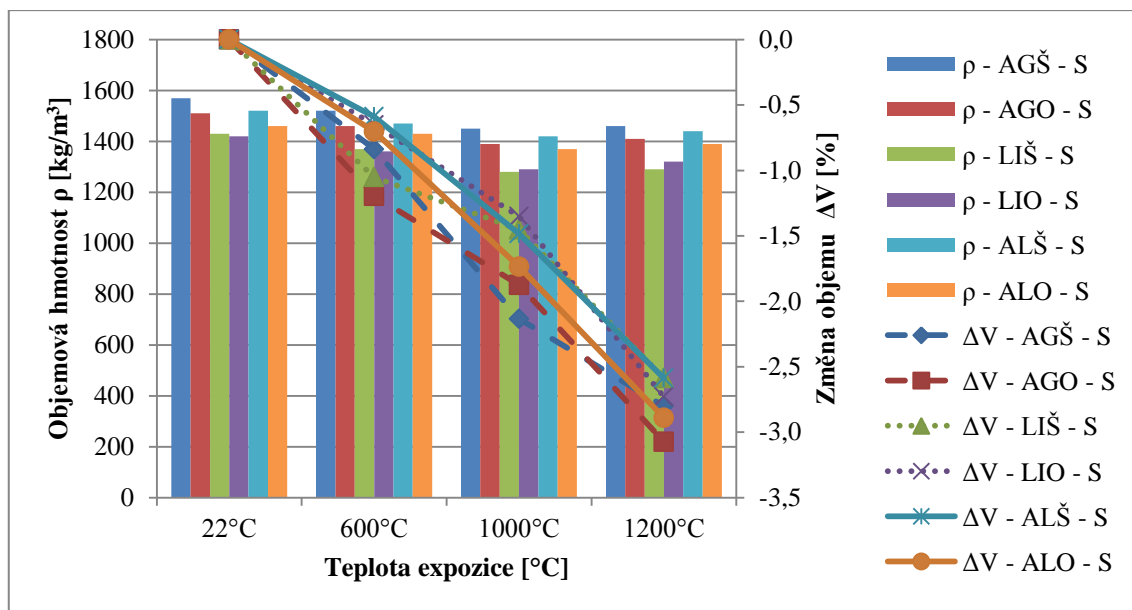
U vzorků stáří 28 dní vystavené 600 až 1200 °C byla největší změna objemové hmotnosti pozorována u receptury AGŠ, která měla při 1000 °C pokles objemové hmotnosti až 7,7 %. Největší změna objemu byla zaznamenána u vzorku ALO, kdy při 1200 °C tato změna dosahovala hodnoty 3,2 %. Nejmenší změny byly patrné u vzorků ALŠ.



Graf 11 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u referenčních malt stáří 90 dní

Objemová hmotnost u vzorků stáří 90 dní po teplotní expozici 600 až 1200 °C klesla nejvíce u receptury AGŠ o 9,7 % a nejméně u receptury LIO o 4,6 %. Oproti tomu největší změna objemu byla vidět u vzorků ALO o 2,7 % a LIO taktéž o 2,7 % a nejnižší u vzorků ALŠ o 2,4 % a AGŠ o 2,3 %.

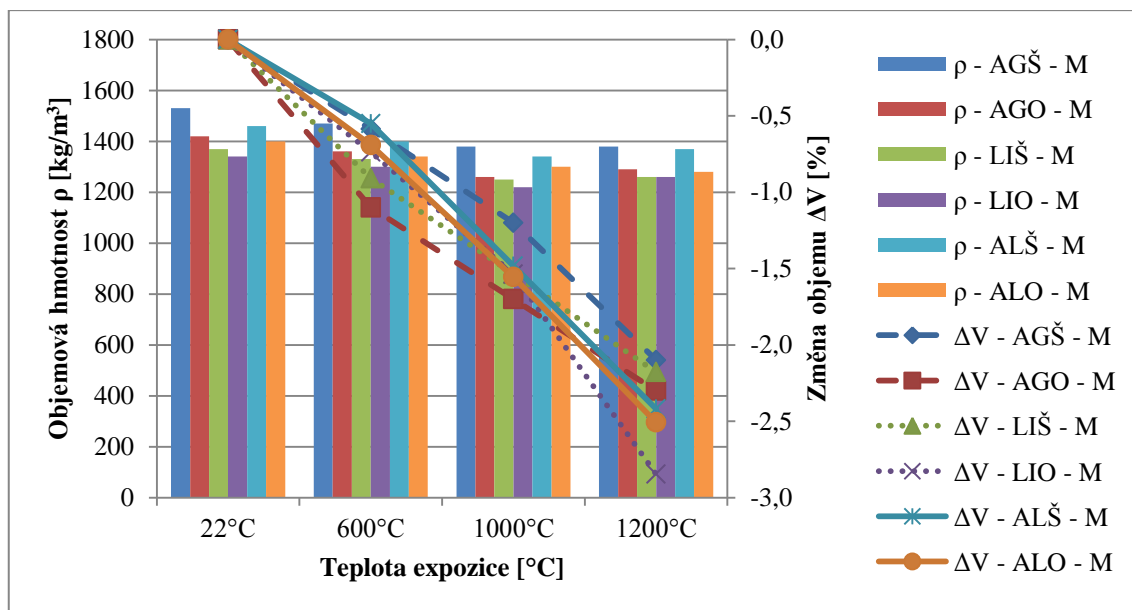
Oproti 28 denním vzorkům měly vzorky po 90 dnech znatelně nižší rozptyl změny objemu u teplot vyšších než 1000 °C. Toto je nejspíš způsobené vyzráním cementového tmelu a pokročilejšímu stadiu všech probíhajících hydratačních reakcí.



Graf 12 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u malt vystavených  $SO_2$

Z Grafu 12 je zřejmé, že největší změna objemové hmotnosti u vzorků vystavených agresivnímu plynu oxidu siřičitému a posléze vysoké teplotě byla u receptury LIŠ – S až 10,2 % a nejnižší u receptury ALO – S 4,9 %. Pokles objemu byl nejzásadnější u směsi AGO – S, konkrétně o 3,1 %, a nejnižší u receptury ALŠ – S o 2,6 % a u receptury LIŠ – S 2,6 %.

Celkový pokles objemu u degradovaných malt byla mírně vyšší než u referenčních malt, z důvodu rozkladu produktů sulfatace, které obsahovaly velké množství chemicky vázané vody. Po odpaření této vody se pravděpodobně ve struktuře vytvořily prostory ovlivňující jak objem, tak celkovou objemovou hmotnost.



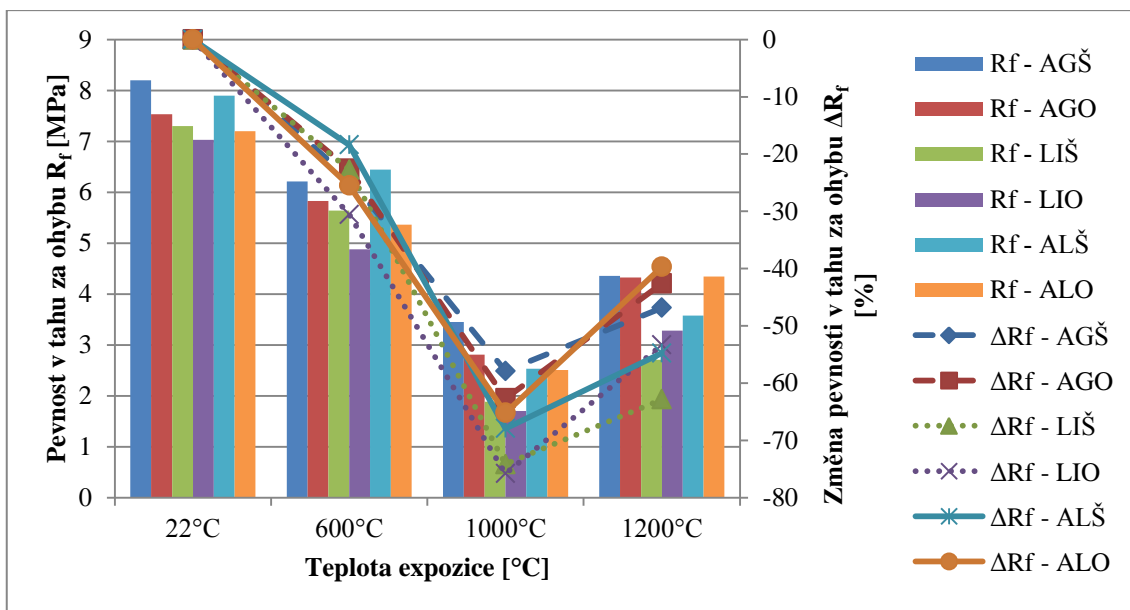
Graf 13 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u malt vystavených zmrazovacím cyklům

V Grafu 13 jsou uvedeny objemové změny a objemové hmotnosti při teplotní expozici u vzorků vystavených mrazu. Největší objemové změny byly prokázány u vzorků s označením LIO – M, kde hodnota objemu klesla o 2,8 %, a nejnižší u malty AGŠ – M o 2,1 %. Nejvyšší pokles objemové hmotnosti byl zaznamenán u receptury AGO – M až 11,4 % a AGŠ – M 9,6 % a nejnižší pokles u směsi ALŠ – M 6,2 %.

Vzorky po zmrazovacích cyklech mají obdobně jako malty vystavené oxidu siřičitému větší změny v objemové hmotnosti vlivem teplotní expozice než vzorky referenční.

### 9.3.3 Pevnost v tahu za ohybu

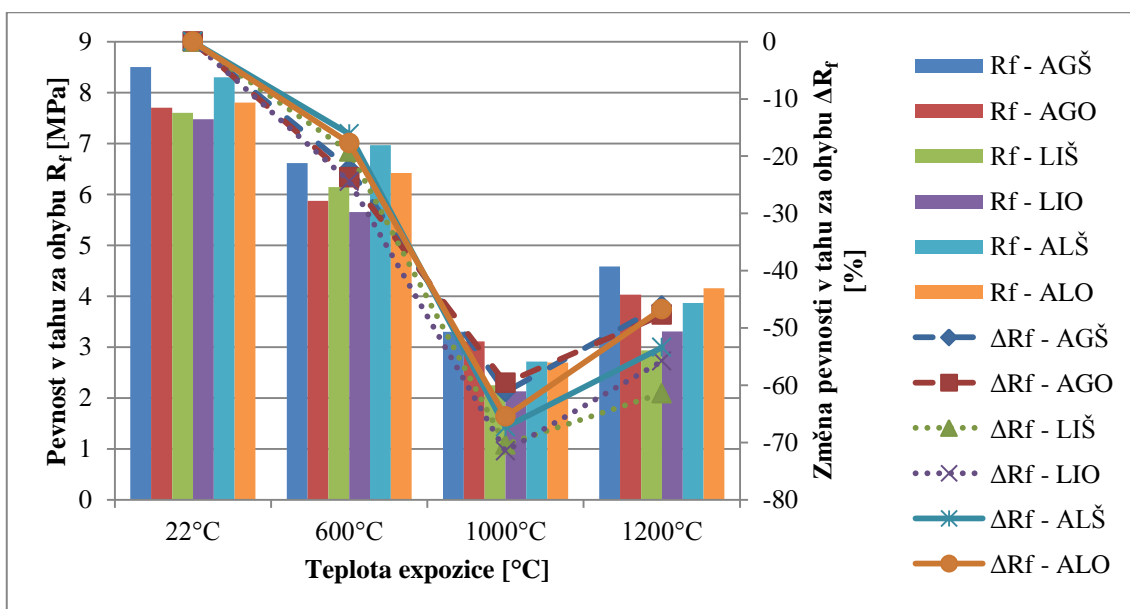
Další sledovanou vlastností u vypálených vzorků malt byla pevnost v tahu za ohybu. Veškeré výsledky jsou uvedeny v Grafech 14 až 17.



Graf 14 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 28 dní

Vlivem vysokým teplot se samozřejmě kromě objemové hmotnosti snižuje také pevnost v tahu za ohybu. Pevnost v tahu klesá po určitou hranici a poté se opět zase mírně zvyšuje vlivem vzniklých keramických vazeb.

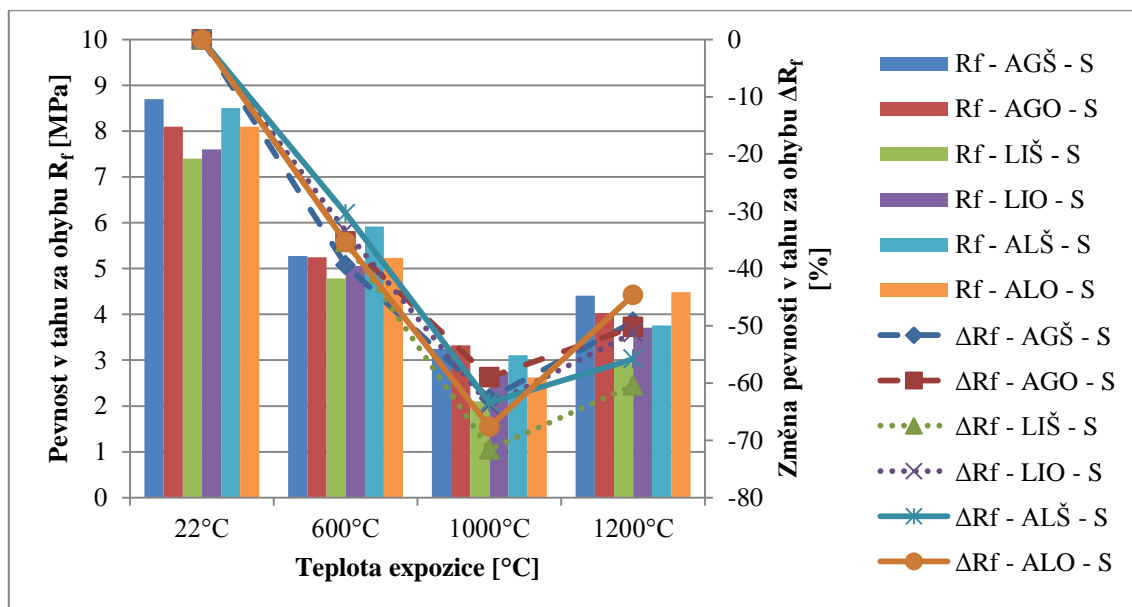
Nejvyšší pokles pevností byl zaznamenán při teplotě 1000 °C u vzorků LIO 75,8 % a nejnižší u malt AGŠ 57,9 %.



Graf 15 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 90 dní

U vzorků stáří 90 dní byl, stejně jako po 28 denním zrání, pokles pevnosti v tahu za ohybu nejvyšší u receptury LIO 71,5 %. Avšak nejnižší pokles pevnosti nebyl u receptury AGŠ, jak by se dalo předpokládat, ale u malty AGO 59,6 %.

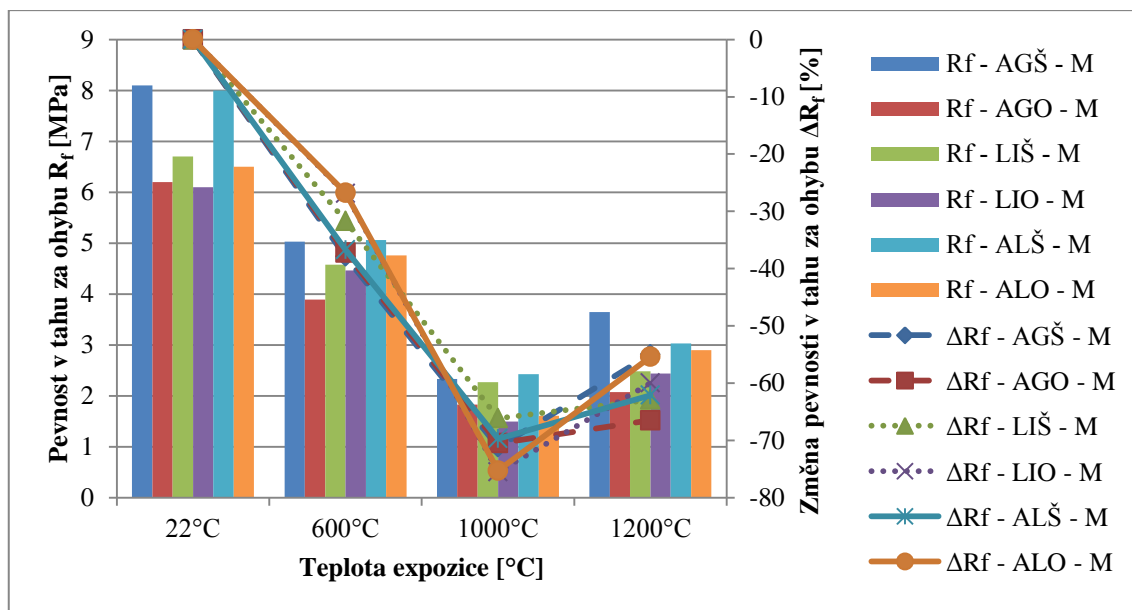
Vyšší poklesy u vzorků s 90 denními pevnostmi byly patrně způsobeny vyšší hutností matrice, kdy průchodnost vzniklé vodní páry a plynů byla zhoršena.



Graf 16 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna u malt vystavených agresivnímu  $SO_2$  a vysokým teplotám

Vzorky vystavené agresivnímu plynu oxidu siřičitému měly oproti referenčním vzorkům vyšší poklesy v pevnosti v tahu za ohybu při působení 600 °C. Zatímco pevnost u referenčních vzorků klesla v průměru o 24 %, tak pevnost u degradovaných vzorků klesla minimálně o 30 %. Tato skutečnost byla vysvětlena rozkladem siřičitanových a síranových produktů při teplotě již 100 – 150 °C. Po odchodu velkého množství páry se ve struktuře vytvořily dutiny a kapiláry snižující soudržnost matrice a kameniva.

Nejvyšší pokles pevnosti byl u receptury LIŠ – S 71,6 % a nejnižší u malty AGO – S 59 %.

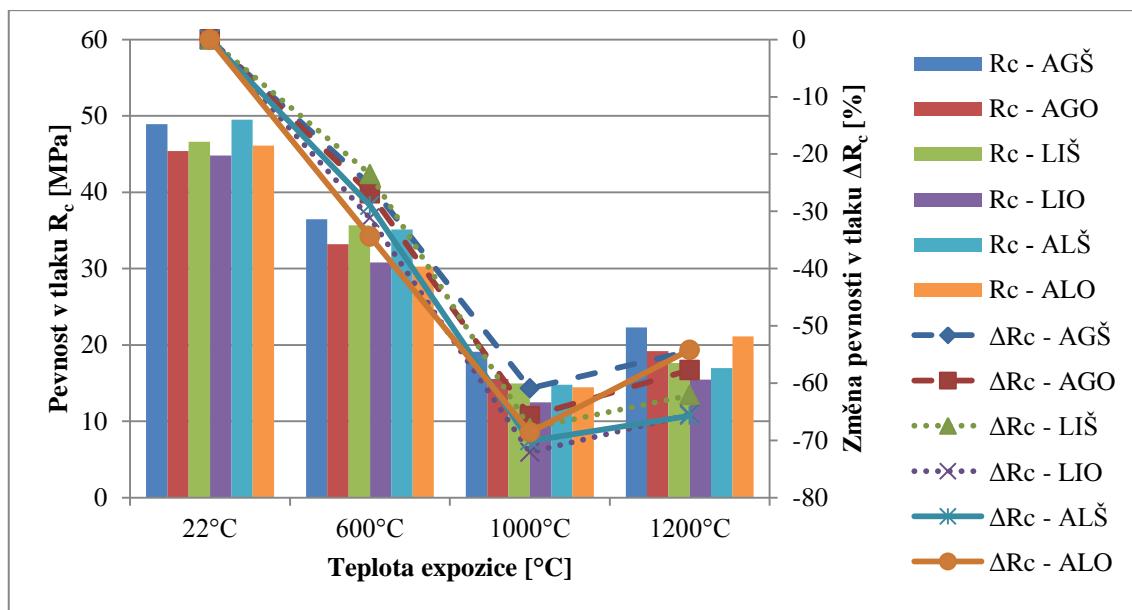


Graf 17 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna u malt vystavených mrazu a vysokým teplotám

Mrazem narušené vzorky měly stejně jako vzorky porušené sulfatací vyšší poklesy pevností při 600 °C, cca 26,7 – 37,9 %, oproti referenčním vzorkům. Nejvyšší rozdíl pevností byl stanoven u receptury LIO – M – 75,5 % a nejnižší u směsi LIŠ – M 66,1 %.

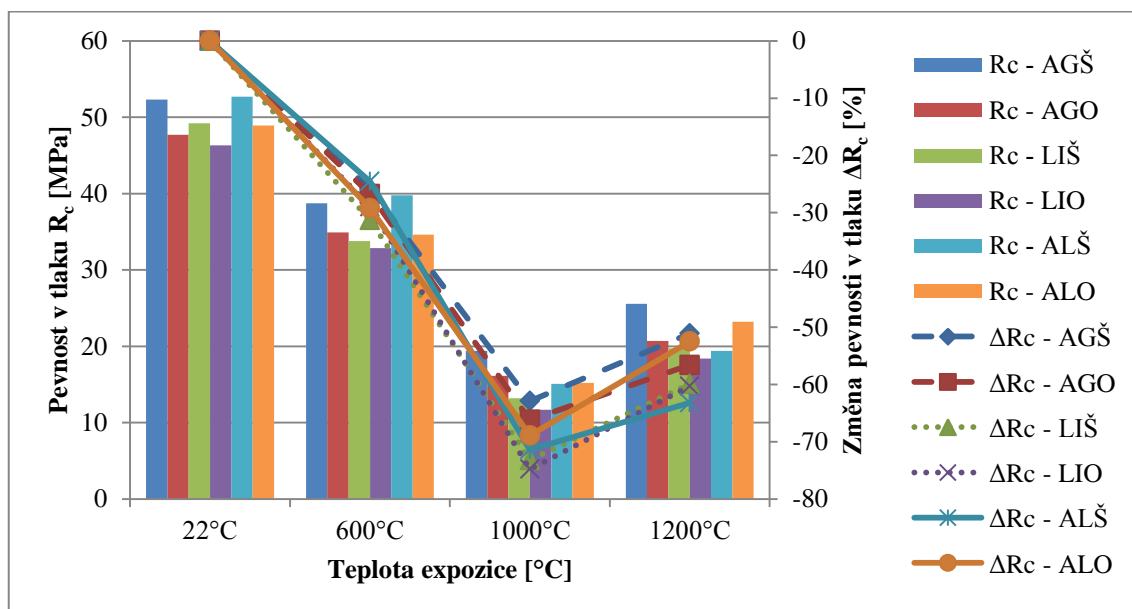
### 9.3.4 Pevnost v tlaku

Kromě pevnosti v tahu za ohybu má teplotní expozice také vliv na pevnost v tlaku. Platí zde obdobně, že se zvyšující se teplotou pevnost v tlaku klesá a po dosažení mezi slinování a tavení opět stoupá. Pevnost v tlaku byla opět sledována na vypálených maltách s 28 denními pevnostmi, s 90 denními pevnostmi, degradovaných agresivním plynem a podrobených zkoušce mrazuvzdornosti. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Grafech 18 až 21.



Graf 18 - Pevnosti v tlaku a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 28 dní

Na základě Grafu 18 byla největší změna pevnosti v tlaku při 1000 °C zaznamenána u receptury LIO 72,1 % a nejnižší u malty AGŠ 60,9 %. Podobné výsledky, zobrazené v Grafu 19, vycházely i u malt s 90 denními pevnostmi. U receptury LIO poklesla pevnost v tlaku až o 74,8 % a u lehké malty AGŠ pouze o 62,9 %.

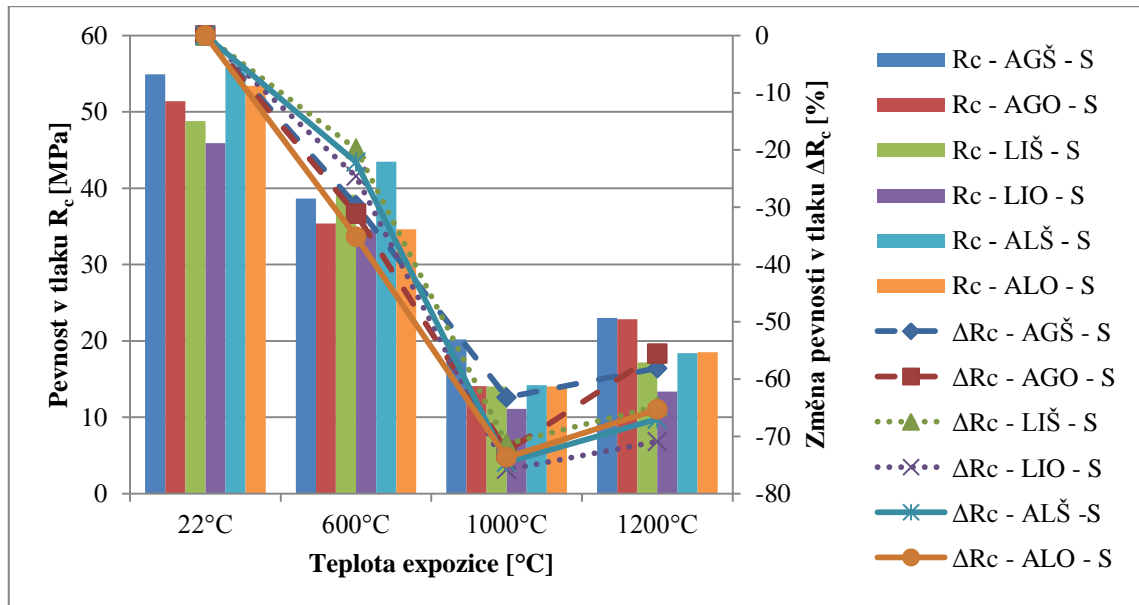


Graf 19 - Pevnosti v tlaku a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 90 dní

Z předešlých grafů je také patrné, že vzorky obsahující agloporit mají vyšší teplotní odolnost, kvůli lepší soudržnosti kameniva s cementovou maticí. Povrch zrn

Liaporu jsou hladší bez otevřené struktury a tím jejich spolupůsobení s cementovým tmelem při teplotní expozici není na tak dobré úrovni jako v případě agloporitu.

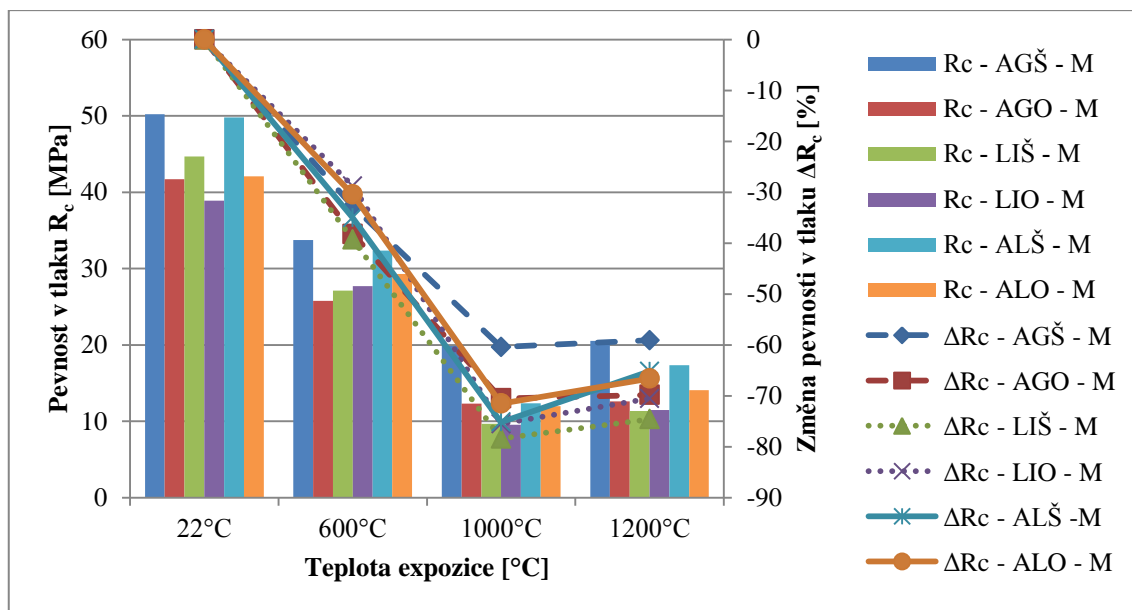
Stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu byla i zde teplotní odolnost mírně snížena vyšší hutností matrice, která se časem mírně zvyšovala, což lze usuzovat na základě vývoje pevnostních charakteristik.



Graf 20 - Pevnosti v tlaku a jejich změna u malt vystavených agresivnímu  $SO_2$  a vysokým teplotám

Při působení teploty 600 a 1000 °C byl pokles pevnosti v tlaku degradované malty agresivním plynem výraznější než u referenčních vzorků. Výraznější pokles byl opět způsoben rozkladem produktů sulfatace. Nejvyšší rozdíl pevností v tlaku při 1000 °C měla receptura LIO - S 75,8 % a nejnižší receptura AGŠ - S 63,2 %.





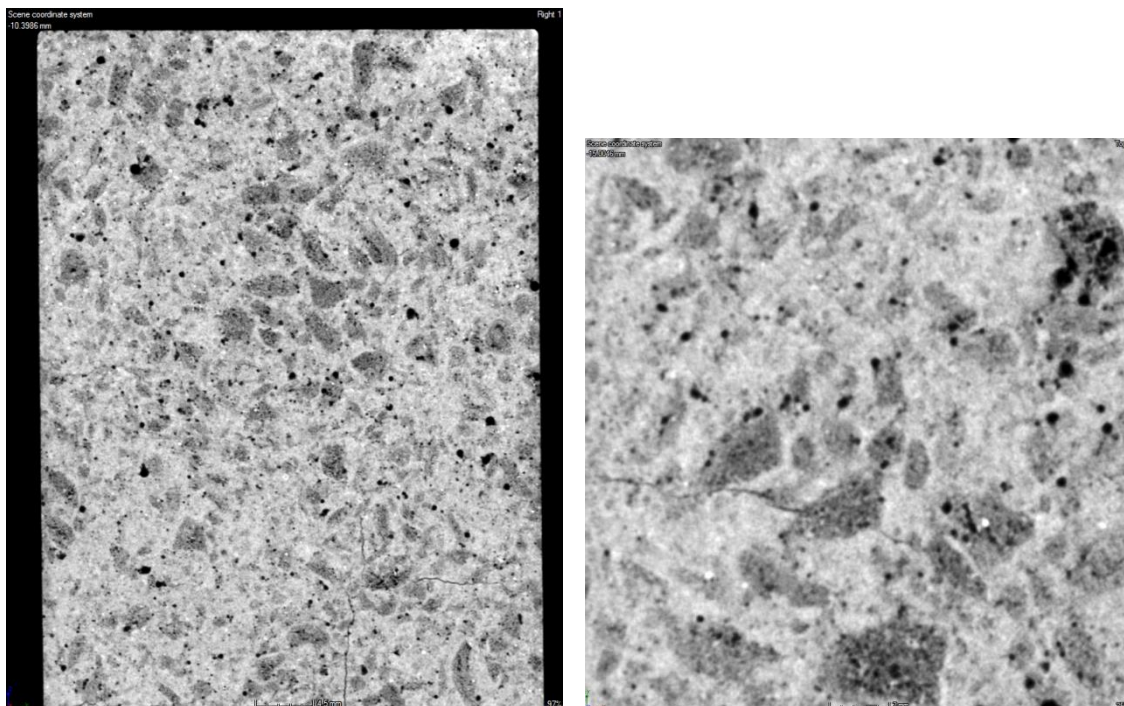
Graf 21 - Pevnosti v tlaku a jejich změna u malt vystavených mrazu a vysokým teplotám

Z hlediska mrazu, zde platí analogie jako u vzorků vystavených procesu sulfatace. Pevnost v tlaku byla působením teploty 600 a 1000 °C výrazněji snížena u degradovaných vzorků než u referenčních. Avšak oproti vzorkům, kde působil agresivní plyn, zde byl zaznamenán nejvyšší pokles u vzorku LIŠ – M 78,4 %. Nejnižší pokles opět vykazovala receptura AGŠ – M 60,4 %.

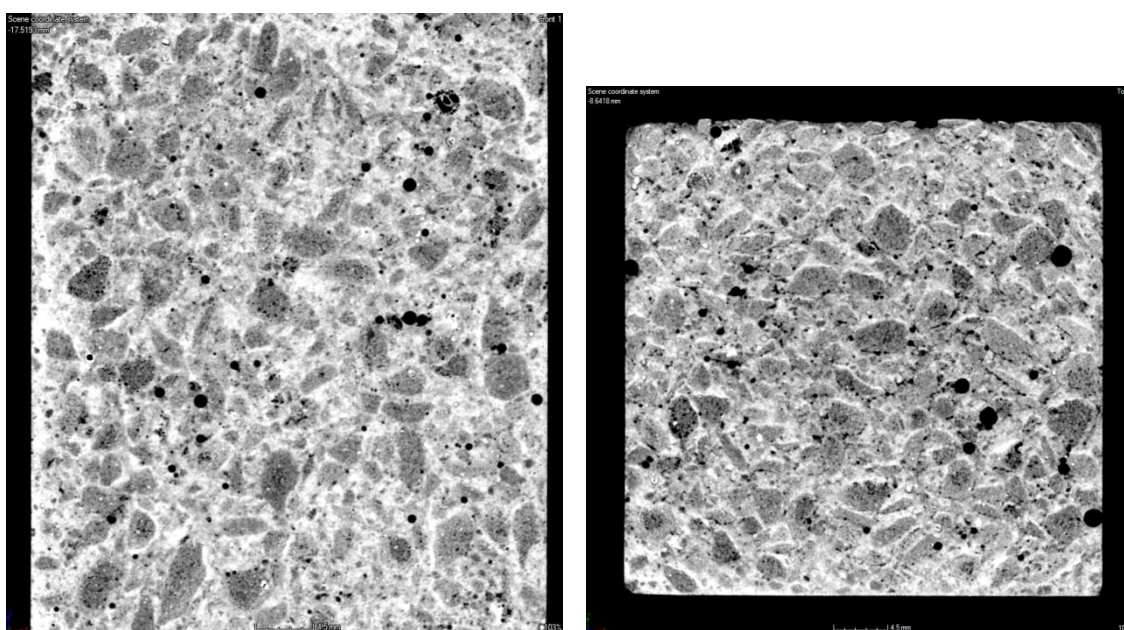
#### 9.4 Posouzení vnitřní struktury pomocí CT

Pomocí počítačové tomografie byly zkoumány vnitřní struktury vybraných zkušebních těles jednotlivých receptur po vystavení agresivnímu prostředí a teplotní expozici 1000 °C.

Na Obrázku 42 je zobrazen průřez vzorku receptury AGO stáří 90 dní. Vzorek AGO vystaven teplotní expozici 1000 °C vykazoval spolu s recepturou AGŠ na základě provedených fyzikálně-mechanických zkoušek vysokou teplotní odolnost. Kromě pravidelného rozprostření kameniva v matrici lze také vidět drobné mikrotrhlínky, které vznikly v důsledku teplotního namáhání. Trhlínky vedou skrz kamenivo a nesklouzávají podél fázového rozhraní, což značí vysokou soudržnost kameniva s matricí. Vzhledem k vysoké soudržnosti kameniva s cementovým tmelem se receptury AGŠ a AGO jeví jako více houževnaté při teplotní zátěži.



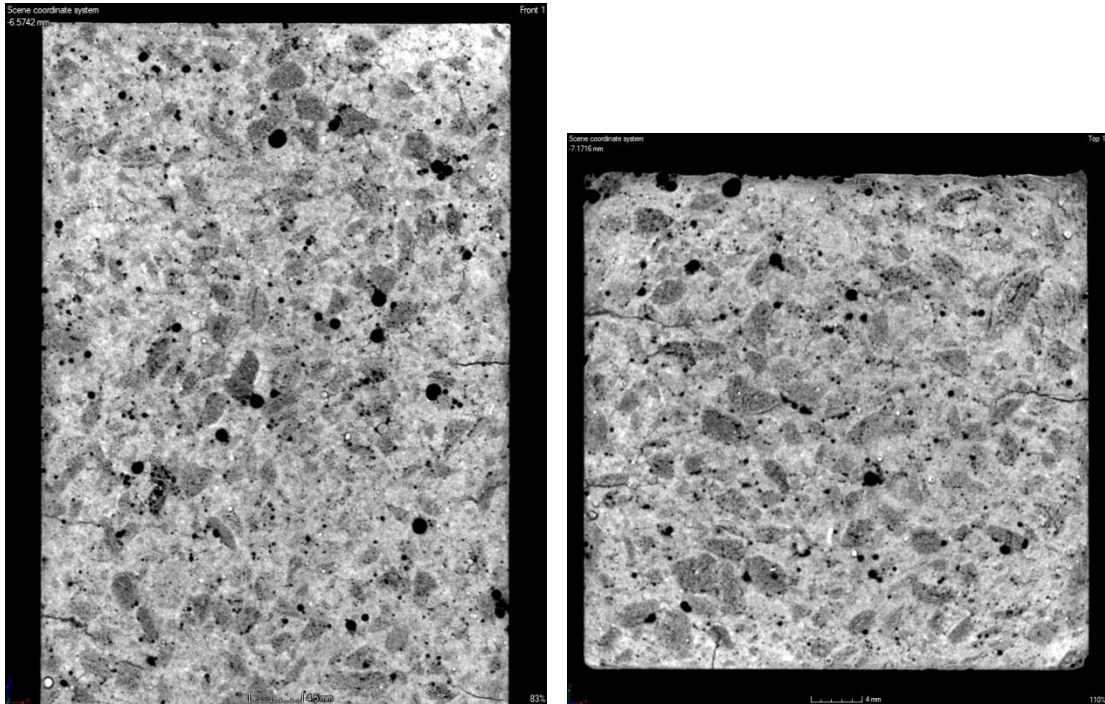
*Obrázek 42 - Průřezy vzorkem s označením AGO po teplotní expozici 1000 °C*



*Obrázek 43 - Průřezy vzorkem s označením ALO po teplotní expozici 1000 °C*

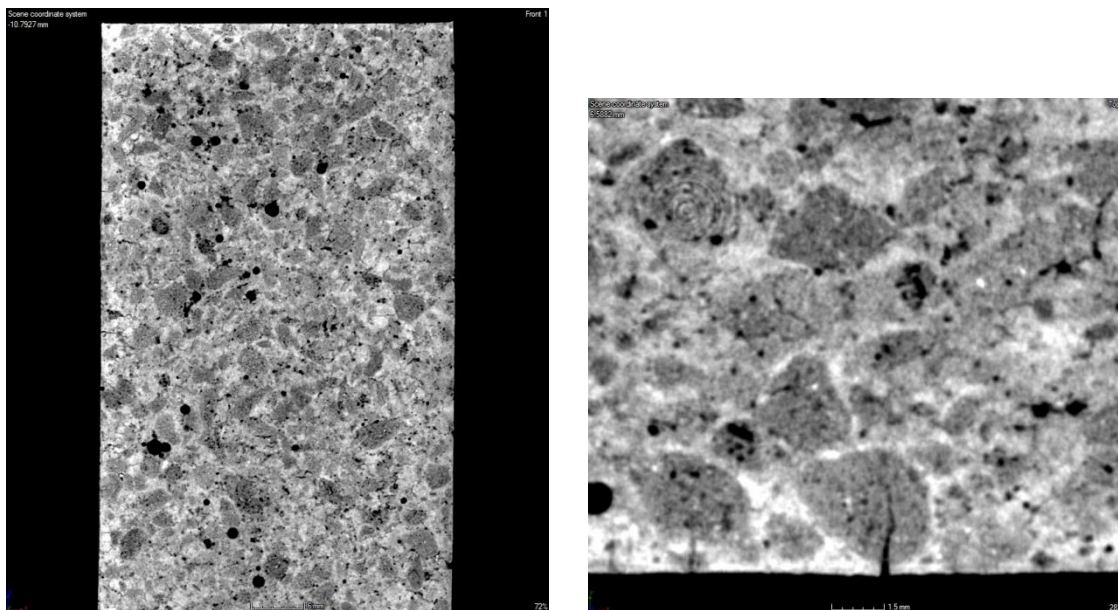
Oproti vzorku AGO má receptura ALO rovnoměrněji zaplněnou strukturu kamenivem. Toho bylo dosaženo smícháním frakcí agloporitu a Liaporu a přiblížení se tak optimální křivce zrnitosti. Z Obrázku 43 je také zřejmé, že stejně jako receptura AGO je i tato receptura ALO velmi teplotně odolná. Ojedinele objevující se mikrotrhlínky byly pozorovány jak v matrici, tak v kamenivu.

Prostřednictvím snímků (Obrázek 44 a 45) z tomografu je možno vidět, že u vzorků AGO a ALO vystavených agresivnímu plynu a poté vysoké teplotě vznikají trhlinky od povrchu ke středu vzorku, které vedou rovnoměrně skrz kamenivo, póry a cementový tmel. Trhliny na povrchu byly patrně vytvořeny v důsledku rozkladu produktů sulfatace.

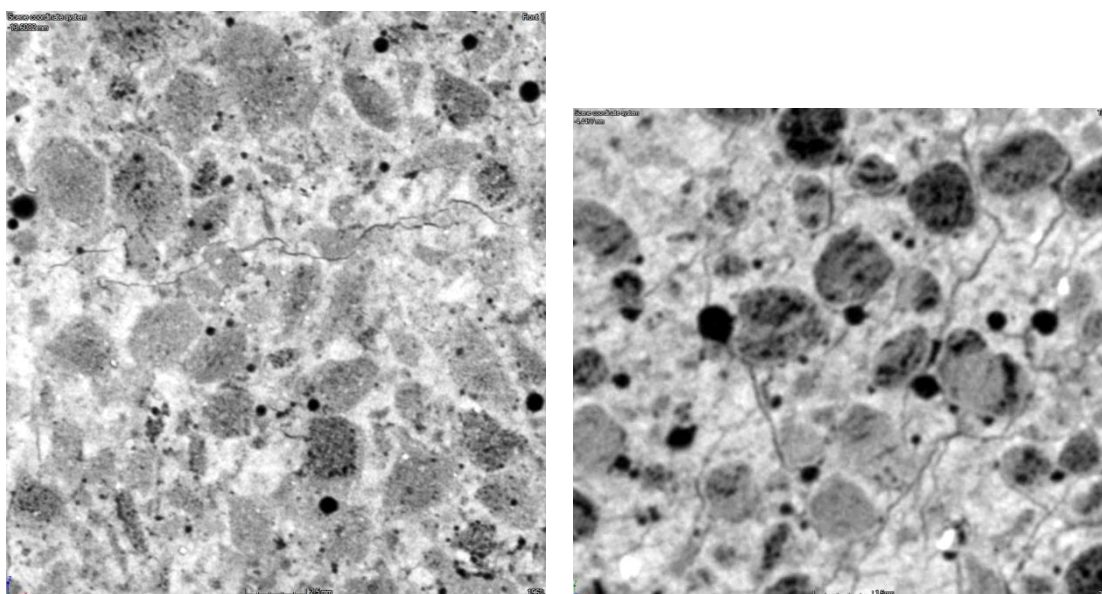


Obrázek 44 - Průřez vzorku AGO - S vystavený agresivnímu plynu  $SO_2$  a teplotní expozici 1000 °C





Obrázek 45 - Průřez vzorku ALO - S vystavený agresivnímu plynu  $SO_2$  a teplotní expozici 1000 °C



Obrázek 46 - Vzorky ALO (vlevo) a LIO (vpravo) vystavené mrazu a teplotě 1000 °C

Působením mrazu a následně vysoké teploty vznikly ve struktuře trhliny a jejich rozložení bylo závislé na druhu receptury. Jak už bylo dříve uvedeno receptury obsahující pouze Liapor se vyznačují nižší soudržností kameniva a cementového tmelu, oproti recepturám obsahujícím agloporit, kde se tato vlastnost výrazně zlepšuje. Tato problematika je potvrzena Obrázkem 46, kde jsou zobrazeny poruchy v okolí kameniva. Zatímco u receptury ALO trhliny vedou skrz kamenivo, u malty s označením LIO tyto trhliny obcházejí kamenivo právě kontaktní zónou matrice a pórovitého kameniva.

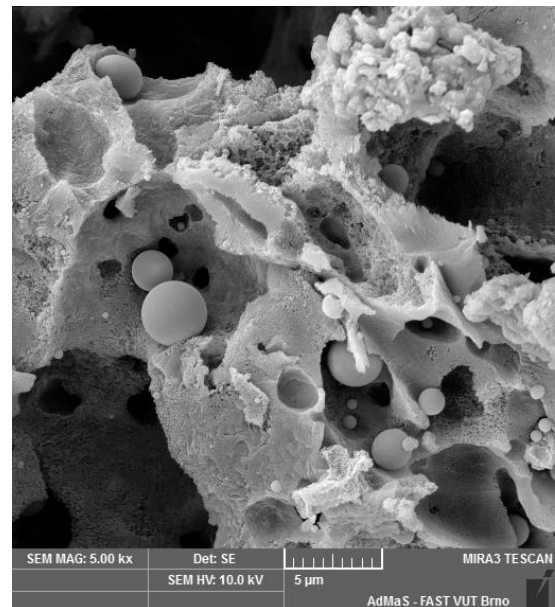
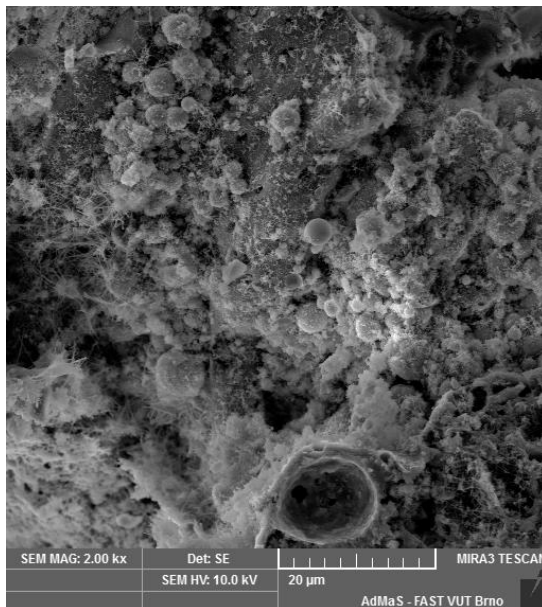
## 9.5 Analýza mikrostruktury s využitím SEM

Pomocí elektronového mikroskopu byla sledována mikrostruktura malt, které obsahovaly oslavanskou škváru, a byly vystaveny agresivnímu plynu, mrazu a posléze teplotnímu namáhání. Vybrané vzorky připravené na analýzu v SEM je možno vidět na Obrázku 47.

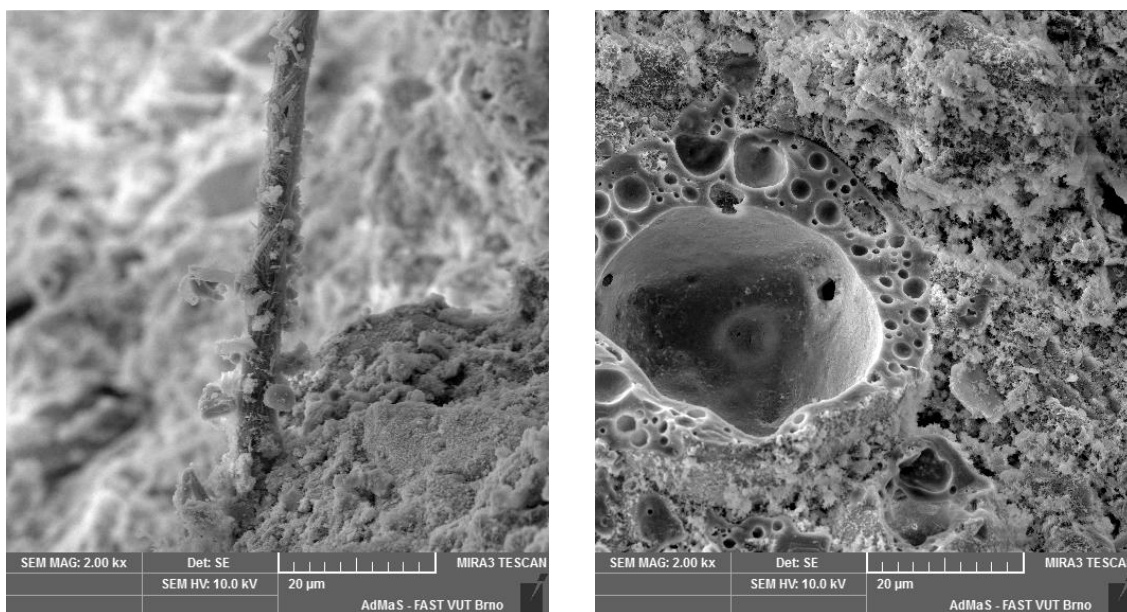


Obrázek 47 - Vzorky připravené na analýzu v elektronovém mikroskopu

V první řadě byla posuzována mikrostruktura u vzorků stáří 90 dní, které zrály za laboratorních podmínek. Na základě analýzy lze konstatovat, že u všech receptur byla mikrostruktura velmi podobná (Obrázek 48 vlevo), byly zde nalezeny některé fáze kompozitu, jako jsou celulózová vlákna (Obrázek 49 vlevo), škvára z Oslavan (Obrázek 48 vpravo), částice mikrosiliky (Obrázek 48 vpravo), a hydratační produkty, jako například CSH fáze a minerál portlandit (Obrázek 50 vpravo).

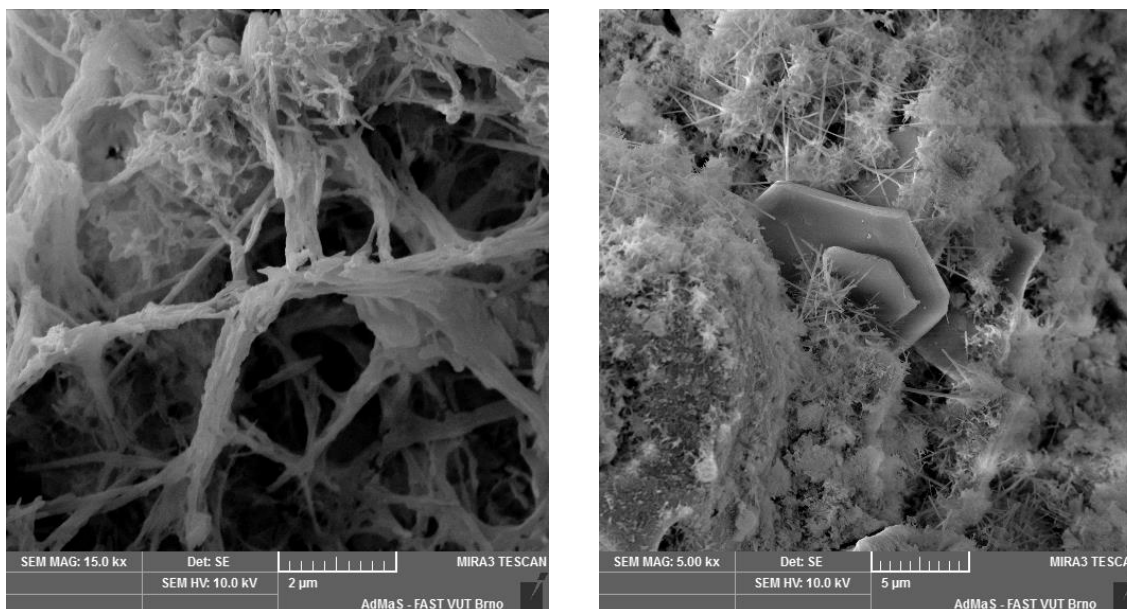


Obrázek 48 - Snímky ze SEM zobrazující mikrostrukturu u referenční receptury AGO stáří 90 dní (vlevo – zvětšeno 2000x) a částice mikrosiliky ve struktuře receptury ALO stáří 90 dní a vystavené agresivnímu plynu  $SO_2$  (vpravo – zvětšeno 5000x)



Obrázek 49 - Snímky ze SEM zobrazující celulózu vlákno ve struktuře referenční receptury ALO stáří 90 dní (vlevo) a sklovitou fází škváry z Oslavan ve struktuře receptury AGO stáří 90 dní a vystavené agresivnímu plynu  $SO_2$  (vpravo) – zvětšeno 2000x

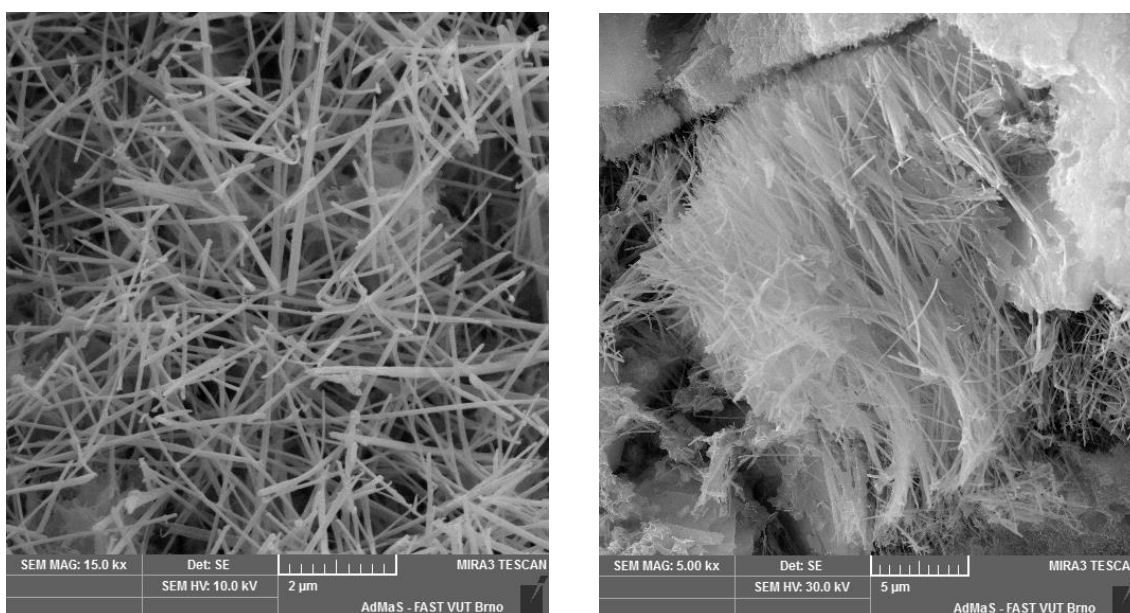
Na Obrázku 49 vpravo je vyobrazena škvára, která jednak kvůli svému menšímu měrnému povrchu a jednak kvůli chemickému a mineralogickému složení zreagovala pouze z části s hydratačními produkty. Na Obrázku 50 vlevo jsou zobrazeny hydratační produkty vytvořené polymerní přísadou.



Obrázek 50 - Snímky ze SEM zobrazující polymerní přísadu ve struktuře receptury AGO stáří 90 dní a vystavené mrazu (vlevo – zvětšený 15000x) a minerál portlandit ve struktuře referenční receptury AGO stáří 90 dní (vpravo – zvětšený 5000x)

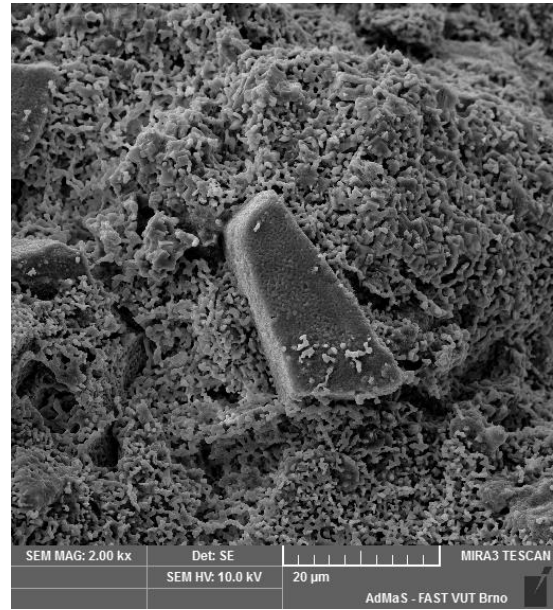
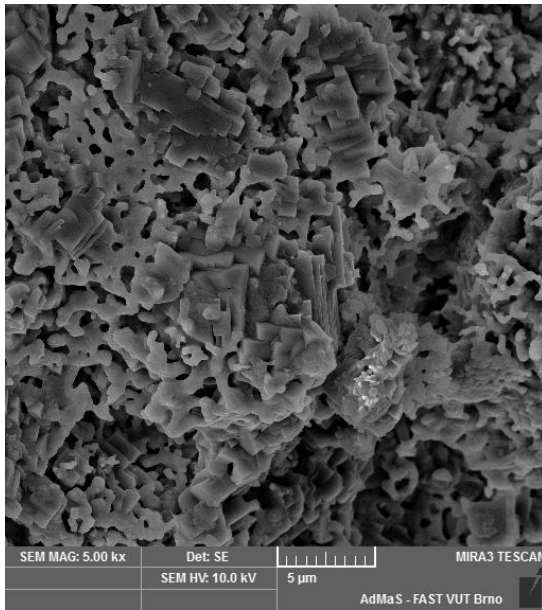


U vzorků vystavených agresivnímu plynu vznikají působením  $\text{SO}_2$  nejrůznější produkty, v rámci analýzy mikrostruktury se podařilo potvrdit hojná přítomnost ettringitu a to nejen v povrchových partiích, ale i uvnitř struktury malt (viz Obrázek 51), ovšem jádro zkušebních těles zůstalo síranovými produkty nezasaženo, což svědčí o poměrně dobré odolnosti vyvinutých malt. Souvislost je patrná zejména s vysokým podílem substituční složky cementu alternativními surovinami, kdy je omezeno množství minerálu  $\text{C}_3\text{A}$ , který je jedním ze zdrojových složek pro vznik síranových produktů.



Obrázek 51 - Snímek ze SEM zobrazující minerál ettringit ve struktuře receptury L10 (vlevo - zvětšení 15000x) a AGO (vpravo - zvětšení 5000x) stáří 90 dní a vystavených agresivnímu plynu  $\text{SO}_2$

Malty vystavené teplotnímu namáhání o teplotě  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  se lokálně (spíše ojediněle) vyznačovaly slinutou strukturou a zaoblenými hranami krystalů (Obrázek 52).



*Obrázek 52 - Mikrostruktura lehké malty po teplotní expozici o teplotě 1000 °C (vlevo – zvětšeno 5000x, vpravo – zvětšeno 2000x)*



## 10 Diskuze výsledků

V rámci experimentální části byla pozornost především zaměřena na výzkum a vývoj optimálních receptur malt odolných vůči působení klimaticky a chemicky agresivního prostředí v kombinaci s extrémními teplotami. Na základě poznatků z teoretického průzkumu především výzkumných prací a článků zabývajících se relevantní problematikou byly zvoleny suroviny, jež se jevily jako potenciálně vhodné pro vývoj hmot zamýšleného účelu. Množství dané suroviny bylo určeno pomocí ověřením fyzikálně-mechanických zkoušek, jako je objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku, na prvotních recepturách malt. Mimo jiné byly také zkušební matrice testovány v pozorovací peci, kde se sledovala jejich teplotní odolnost v závislosti na složení malty, tedy množství a typu konkrétní suroviny.

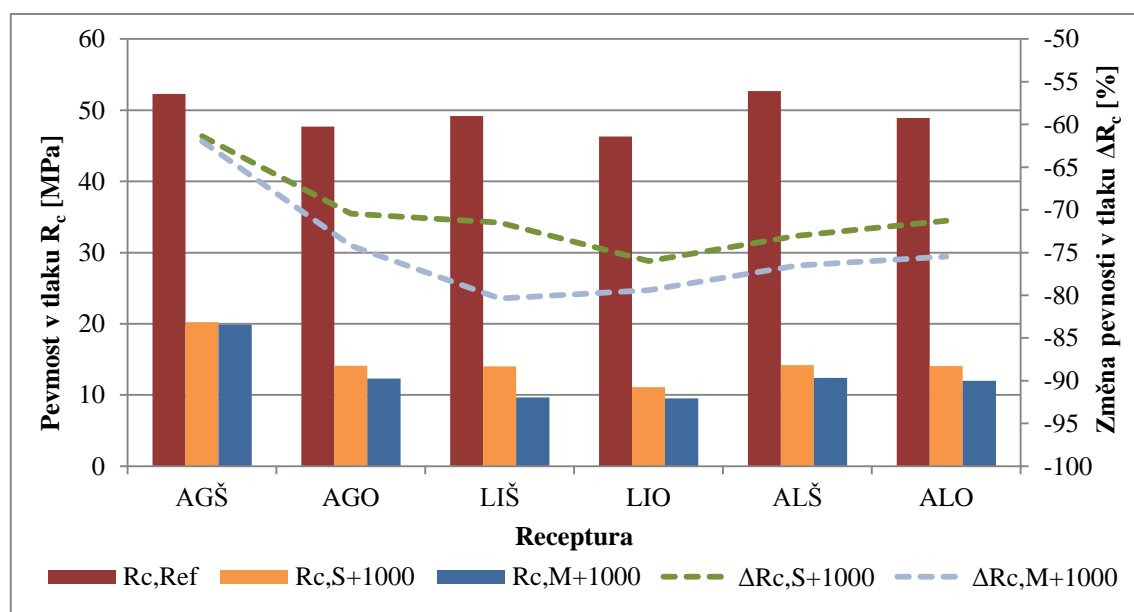
Jako jedna z alternativních surovin pro modifikaci složení pojiva v optimalizovaných recepturách byla zvolena vysokopecní struska Štramberk a škvára Oslavany. Škvára byla zvolena, protože vykazovala nejen dobré vlastnosti, ale také představovala určitý potenciál pro využití druhotných surovin ve stavebnictví. Náhrada cementu uvedenými příměsemi byla v rámci zvýšení teplotní odolnosti malt, zvýšení odolnosti malt vůči agresivnímu prostředí (omezení  $C_3A$  v pojivu) a snížení ekonomické a ekologické náročnosti optimalizovaných receptur zvolena na 40 % z hmotnosti cementu. Při použití kombinace škváry a vysokopecní strusky byl poměr složek 1 : 1 objemově.

Při výběru vhodného plniva bylo zvoleno uměle vyrobené lehké kamenivo agloporit a keramzit (Liapor), které díky svojí pórovité struktuře snadněji odolává extrémním podmínkám, zejména jako je vysoká teplota.

Po optimalizaci prvotních receptur bylo dalším krokem testování jejich chování v extrémních podmínkách, konkrétně v mrazu, v prostředí s agresivním plynem  $SO_2$ , při teplotní expozici do 1200 °C a při kombinaci uvedeného namáhání. Jejich odolnost byla stanovena na základě výsledků fyzikálně-mechanických zkoušek doplněných analytickými technikami umožňujícími nedestruktivní posouzení trojrozměrné struktury (počítačová tomografie) a mikrostruktury (rastrovací elektronový mikroskop).

V rámci experimentálního výzkumu byly zjištěny následujících poznatky a souvislosti:

- zvyšováním teploty se objemová hmotnost, objem, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku snižuje po určitou mez, po překročení této hranice se zmíněné vlastnosti opět zvyšují vlivem přechodu hydraulických vazeb na keramické;
- největší pokles všech vlastností byl zaznamenán při teplotách 1000 °C;
- působením vysoké teploty se vypařuje veškerá volná i vázaná voda a jednotlivé složky kompozitu se rozkládají za vzniku plynů. Odchodem vody a plynů vznikají dutiny a kapiláry snižující pevnosti a objemové hmotnosti.
- nejlepší teplotní odolnost vykazují receptury AGŠ a AGO, poté ALŠ a ALO a jako nejméně odolné se jeví receptury LIŠ a LIO. Obecně je tedy při optimalizaci receptury odolné teplotnímu namáhání podstatnější druh použitého kameniva. Toto tvrzení je podloženo grafem níže, kde kromě vlivu kameniva lze vidět větší pokles pevností v tlaku po teplotní expozici u malt vystavených zmrazovacím cyklům než u malt degradovaných agresivním plynem SO<sub>2</sub>.



Graf 22 - Pevnosti v tlaku po 90 dnech referenčních malt a malt vystavených mrazu a agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> po teplotní expozici 1000 °C a změna 90 denních pevností v tlaku degradovaných malt působením teploty 1000 °C v závislosti na referenčních maltách

- vhodně zvolený typ pórovitého kameniva v kombinaci s dostatečně odolnou maticí může být za určitých podmínek použit pro docílení kompozitního materiálu s velmi dobrou odolností při kombinovaném namáhání mrazem, agresivním SO<sub>2</sub> a extrémními teplotami;

- pórovité kamenivo může značně ovlivnit zpracovatelnost a finální strukturu kompozitu kvůli své vysoké nasákavosti. Z tohoto důvodu je důležitá saturace před aplikací kameniva do čerstvé směsi optimálním množstvím vody.
- výhodou rozdílnosti tvaru zrn agloporitu a keramzitu je ve prospěch agloporitu zvýšení pevnosti v tahu za ohybu, avšak na straně druhé se jedná oproti Liaporu o mírné zhoršení zpracovatelnosti čerstvé směsi při stejné dávce vody;
- agloporit vzhledem k otevřenější struktuře povrchu lépe spolupůsobí s cementovou maticí než kamenivo Liapor (což souvisí mimo jiné se soudržností zrn a matrice);
- snížená soudržnost Liaporu s cementovým tmelem se projevuje při namáhání vznikem trhlin ve fázovém rozhraní a nikoliv v kamenivu, jako je tomu u agloporitu;
- kamenivo agloporit zvyšuje teplotní odolnost celého kompozitního systému. S ohledem na výhodnější modul pružnosti a pravděpodobně i dilatačně / kontrakční parametry včetně soudržnosti s maticí nepodléhá agloporit porušení vlivem rozdílné teplotní roztažnosti.
- kombinace Liaporu a agloporitu zajistí vyšší hutnost kompozitu a tudíž sníží propustnost agresivního plynu strukturou;
- použitím agloporitu 0-4 mm bylo dosaženo vysoké hutnosti, ale vysoké množství jemné frakce značně ovlivnilo zpracovatelnost čerstvé malty;
- se zvyšujícím se množstvím pojiva, cementu či mikrosiliky se zvyšuje hutnost a nepropustnost kompozitu, ale jeho teplotní odolnost se snižuje;
- obsažená celulózová vlákna (vyrobená z alternativních surovin) znatelně přispívají k teplotní odolnosti systému;
- časem se zvyšuje hutnost kompozitního systému, čímž se mírně snižuje teplotní odolnost, z důvodu nedostatečného prostoru pro odchod plynných látek vznikajících při tepelném rozkladu, z čehož plyne při vývoji teplotě odolných polymercementových kompozitů potřeba ověření jejich vlastností i v dlouhodobějším časovém úseku;
- vysokopecní struska obecně vykazuje lepší vlastnosti než škvára, protože se více uplatňuje při vytváření hydratačních produktů, ovšem z hlediska teplotní odolnosti nelze rozhodnout, která z uvedených strusek je lepší;
- zvýšením měrného povrchu škváry se mohou zlepšit její vlastnosti, vzhledem ke snadnějšímu zabudování do struktury kompozitu a zvýšení její reaktivity při hydratačních reakcích v polymercementové maticí, neboť obsahuje vyšší množství amorfni fáze a současně  $\text{SiO}_2$ ;

- působením oxidu siřičitého na vyvinuté pórovité malty při koncentraci 0,9 % a době cyklického působení po dobu 60 dní vznikají ve struktuře kompozitu produkty sulfatace, které zaplňují dutiny kompozitního systému a zvyšují tak jeho pevnost, povrchovou mikrotvrdost a objemovou hmotnost;
- struktura malt obsahující Liapor se s největší pravděpodobností vyznačuje pórovitější strukturou, tudíž plyn může snadněji pronikat do nitra vzorku, kde v důsledku nízké soudržnosti kameniva s matricí vytvoří poruchy, které snižují celkové pevnosti;
- lehká malta obsahující agloporit má vyšší síranovou odolnost s ohledem na lepší spolupůsobení matricí a pórovitého kameniva;
- z hlediska vlivu mrazuvzdornosti na ohybové vlastnosti není tolik rozhodující druh kameniva jako při vývoji tlakových pevností;
- dle součinitele mrazuvzdornosti bylo dokázáno, že všechny uvedené receptury jsou mrazuvzdorné na uvedený počet cyklů.

## E Závěr

Neustálým vývojem stavebnictví se i požadavky na stavební materiál zpřísňují. Kromě požární odolnosti, prostřednictvím které lze zvýšit požární bezpečnost staveb při požáru, je podstatná i mrazuvzdornost a odolnost vůči agresivním plynům. Ačkoliv se průmyslové odvětví snaží vhodnými opatřeními omezit množství emisí škodlivých plynů, tak i přesto je koroze agresivním plynem velice aktuálním tématem.

Dalším neméně důležitým požadavkem je samozřejmě cena a ekologické hledisko. Využitím alternativních surovin získaných z různých vhodně upravených odpadů, vedlejších produktů energetiky, hutnictví atp. lze docílit nejen nižších nákladů na výrobu stavebního materiálu, ale také znatelně přispět ke zlepšení environmentální situace. Využití surovin, které by jinak nenalezly dalšího či perspektivního uplatnění, má vliv na snížení mimo jiné emisí, příp. nákladů na skládkování, což souvisí se zatížením životního prostředí.

V rámci diplomové práce bylo navrženo 6 receptur lehkých malt obsahujících vysoké množství alternativních surovin a odolných extrémním podmínkám. Na základě sestavených receptur byly vytvořeny sady zkušebních těles o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm, u nichž byla testována jejich odolnost vůči teplotnímu namáhání do  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatěžování zmrazovacími cykly, agresivnímu plynu  $\text{SO}_2$  a kombinaci předešlého namáhání. Tato odolnost byla stanovena na základě měnicích se fyzikálně-mechanických vlastností struktury a mikrostruktury.

Pro naplnění cílů práce byla v teoretické části provedena aktualizace poznatků relevantní odborné literatury, norem a dosavadních výzkumů se zaměřením na studium procesů probíhajících v kompozitu při extrémním namáhání, na faktory ovlivňující odolnost lehkých malt a na použití nejrůznějších druhů alternativních surovin.

Experimentální část se věnovala postupným vývojem a výzkumem navržených malt. Použitím pórovitého kameniva bylo zjištěno, že lze dosáhnout velmi dobrou teplotní odolnost, tak i odolnost vůči dalšímu namáhání, kterou lze charakterizovat jako výrazně zvýšenou v porovnání s běžnými hmotami tohoto typu. Vhodnějším kamenivem se jeví agloporit, u kterého bylo prokázáno lepší spolupůsobení s polymercementovou maticí, kdy celý systém fungoval jako jednotnější celek, který lépe odolával vnitřnímu namáhání struktury zapříčiněnému kombinací nepříznivých vlivů a extrémních podmínek. Příčinou může být také menší rozdíl v dilatačně / kontrakčních parametrech agloporitu a navržené matrice.

Svůj podíl na velmi dobrých rezistenčních vlastnostech mají i použité substituční složky matrice na bázi alternativních surovin, konkrétně vysokopecní struska a teplárenská škvára, které svojí teplotní odolností přispívají k celkové odolnosti matrice. Podstatný vliv mají také obsažená celulózová vlákna, která přispívají nejen ke snížení objemových změn při zrání malty, ale také ke zvýšení teplotní odolnosti. Vlákna v průběhu vysokých teplot postupně vyhořívají, vytváří prostor pro únik páry a plynů a tak snižují celkové vnitřní napětí. V případě polymerních vláken se rovněž jednalo o produkt získaný z alternativních surovin (recyklovaná celulóza).

Na základě výsledků fyzikálně-mechanických zkoušek lze pro případný navazující výzkum doporučit receptury AGŠ, AGO, ALŠ a ALO, které se prokázaly jako nejlépe odolné v extrémních podmínkách. V případě receptury obsahující agloporit 0-4 mm by bylo v budoucnu vhodné snížit obsah jemné frakce, která ovlivňuje zpracovatelnost čerstvé malty a také její hutnost. Tato jemná frakce totiž obsahuje vysoké množství velmi jemných podílů v porovnání např. s použitým keramzitem frakce 0-1 mm. Ačkoliv oslavanská škvára znatelně přispívá ke zvýšení odolnosti vůči agresivnímu prostředí, lze při jejím příštím použití doporučit zvýšení jejího měrného povrchu, čímž by mohlo být dosaženo vyššího zapojení při hydrataci cementového tmelu. Tento potenciál lze předpokládat na základě provedených analýz škváry – vysoký podíl amorfni frakce v kombinaci s  $\text{SiO}_2$ . Jak už bylo řečeno kromě kameniva a příměsí zvyšují teplotní odolnost i celulózová vlákna, u kterých by bylo vhodné vyzkoušet receptury s jejich zvýšeným obsahem. Dále by v rámci navazujícího výzkumu bylo vhodné se zabývat i dlouhodobějším působením agresivních vlivů a zaměřit se např. na posouzení hloubky průniku síranových produktů do struktury daného kompozitu pomocí vhodných analytických metod, jako jsou například: XRD, XRF, DTA aj. V závislosti na čase by bylo také možné stanovit obsah jednotlivých produktů sulfatace v několika vzdálenostech od povrchu zkoumaného vzorku a tím poměrně detailně popsat mechanismus jejich průniku a tvorby v lehkých maltách obsahujících vysoký obsah alternativních surovin jako modifikačních složek matrice, kameniva i rozptýlené výztuže.

Závěrem lze konstatovat, že předložená diplomová práce splnila stanovené cíle. V práci jsou uvedeny optimalizované receptury lehkých malt na bázi vysokého obsahu alternativních surovin, které se vyznačují vysokou odolností v uvedených extrémních podmínkách.

## F Použitá literatura

- [1] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: Modul MO1* [online]. Brno: VUTIUM, 2005 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ04-Technologie%20betonu%20I/technologie%20betonu%20I.pdf>.
- [2] MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. *Atmosférická koroze betonů*. Praha: IKAS, 1998. ISBN 80-902-5580-9.
- [3] FIALA, Jiří. *Vlastnosti cementových betonů při působení vysokých teplot* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=74666](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=74666). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [4] YUAN, Guanglin a Qingtao LI. *Construction and Building Materials: The use of surface coating in enhancing the mechanical properties and durability of concrete exposed to elevated temperature* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2015 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815301410>.
- [5] COMSA, Teodora. *Spalling Mechanism in Concrete Exposed to Elevated Temperatures* [online]. Aalborg, 2013 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://projekter.aau.dk/projekter/files/80130030/Rapport.pdf>. Master Thesis. Aalborg University. Vedoucí práce Lars Damkilde.
- [6] WANG, Xuejing. *Concrete modeling in hot conditions: Cracking behavior and material stiffness decay* [online]. Milano, 2016 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwj1PbOuKbYAhUqS5oKHZXDA2gQFgg2MAE&url=https%3A%2F%2Fwww.politesi.polimi.it%2Fbitstream%2F10589%2F123762%2F3%2FConcrete%2F520Modeling%2520in%2520Hot%2520Conditions-Cracking%2520Behavior%2520and%2520Material%2520Stiffness%2520Decay.pdf&usg=AOvVaw3rwKBQbSIOYVrXCPz3-Bif>. Diploma thesis. Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale. Vedoucí práce Prof. Roberto Felicetti.

- [7] AYDIN, Serdar. *ScienceDirect: Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2008 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711208000167?via%3Dihub>.
- [8] MELICHAR, Tomáš a Jiří BYDŽOVSKÝ. *ScienceDirect: Polymer-silicate composite based on alternative raw materials under conditions of increased temperature* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2016 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317866?via%3Dihub>.
- [9] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [10] PAVEL, Šafrata. *Studium možností zlepšení mrazuvzdornosti betonů* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/64691/35693.pdf?sequence=-1>.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [11] EDITED BY C.L. PAGE AND M.M. PAGE. *Durability of concrete and cement composites* [online]. Cambridge, 2007 [cit. 2017-12-26]. ISBN 978-184-5693-398. Dostupné z: <http://engineeringbookspdf.com/download/2017/11/191117/Durability%20of%20Concrete%20and%20Cement%20Composites%20By%20C%20L%20Page%20and%20M%20M%20Page.pdf>.
- [12] *Příručka technologa beton: suroviny-výroba-vlastnosti* [online]. Beroun: Hiedelberg cement group, 2010 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: [http://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/publikace/dd005446dfc8af01490e11d6a4f2c0df43bb981a\\_uploaded\\_prirucka-technologa-beton.pdf](http://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/publikace/dd005446dfc8af01490e11d6a4f2c0df43bb981a_uploaded_prirucka-technologa-beton.pdf).
- [13] KUCHARCZYKOVÁ, B., Z. KERŠNER, O. POSPÍCHAL, P. MISÁK a T. VYMAZAL. Influence of freeze–thaw cycles on fracture parameters values of lightweight concrete. *Procedia Engineering* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2010, April 2010, 2(1), 959-966 [cit. 2017-12-23]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810001050>



- [14] KUCHARCZYKOVÁ, B., Z. KERŠNER, O. POSPÍCHAL, P. MISÁK, P. DANĚK a P. SCHMIDT. *Construction and Building Materials* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2012 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811007574?via%3Dihub>
- [15] POSPÍCHAL, O., B. KUCHARCZYKOVÁ, P. MISÁK a T. VYMAZAL. *Freeze-thaw resistance of concrete with porous aggregate* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2010 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810000573?via%3Dihub>
- [16] LEE, Ming Ju, Ming Gin LEE, Jing Yu CHEN a Mang TIA. Strength and Freeze-Thaw Testing of Lightweight Aggregate Concretes. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, Switzerland, 2013, **723**, 507-514 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.723.507. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.723.507>.
- [17] SHI, Gan-Yin, Xin QIU, Bo-Fei CHEN a Jiang-Ying CHENG. *Effect of Freeze-thaw Cycles on Dynamic Mechanical Properties of Ceramsite Concrete* [online]. Ningbo, 2014 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjLmvDbnKDYAhUrAZoKHRFKA4kQFghdMAw&url=http%3A%2F%2Fdownload.atlantispress.com%2Fphp%2Fdownload\\_paper.php%3Fid%3D14796&usg=AOvVaw0XBcgW0fc0oLy1yxjmV\\_67](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=13&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjLmvDbnKDYAhUrAZoKHRFKA4kQFghdMAw&url=http%3A%2F%2Fdownload.atlantispress.com%2Fphp%2Fdownload_paper.php%3Fid%3D14796&usg=AOvVaw0XBcgW0fc0oLy1yxjmV_67).
- [18] DROCHYTKA, Rostislav. *Trvanlivost stavebních materiálů*. Brno: VUTIUM, 2007.
- [19] Oxid uhličitý. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_uhli%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhli%C4%8Dit%C3%BD).
- [20] NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration: Earth System Research Laboratory [online]. Boulder, 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>.

- [21] HORÁK, Josef, Igor LINHART a Petr KLUSOŇ. *Úvod do toxikologie a ekologie pro chemiky*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2004. ISBN 80-7080548-x.
- [22] KRÁLOVÁ, Helena a Břetislav TEPLÝ. Koncentrace oxid uhičitého - karbonatace betonu - koroze výztuže. *Beton-Techologie-Konstrukce-Sanace: Věda a výzkum*. 2001, (5).
- [23] ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/Obsah\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/Obsah_CZ.html).
- [24] HIME, William G. a Bryant MATHER. *Cement and Concrete Research 29 (1999) 789–791: "Sulfate attack," or is it?* [online]. USA: Pergamen, 1999 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888469900068X?via%3Dihub>.
- [25] STRATILOVÁ, Lenka. *Identifikace novotvořených minerálních fází v betonu dlažebních kostek* [online]. Brno, 2010, 16 s. [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/270378/prif\\_b/RESERSE.doc](https://is.muni.cz/th/270378/prif_b/RESERSE.doc). Rešerše k bakalářské práci, MASARYKOVA UNIVERZITA - Přírodovědná fakulta. Vedoucí práce Doc. RNDr. Marek Slobodník, CSc.
- [26] RAHMAN, M. M. a M. T. BASSUONI. Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation. *Construction and Building Materials* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2014, **73**, 652-662 [cit. 2017-12-26]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.034. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814010502>.
- [27] ROVNANÍKOVÁ, Pavla a Pavel ROVNANÍK. *Stavební chemie, Modul 2: Anorganická chemie a chemie anorganických stavebních materiálů* [online]. 2004 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjBktPttc3YAhXHCJoKHWaqAuwQFggvMAE&url=http%3A%2F%2Fflences.cz%2Fdomains%2Fflences.cz%2Fskola%2Fsubory%2FSkripta%2FBC01-Stavebni%2520chemie%2FStavebni%2520chemie%2520M02->

[Anorganicka%20chemie%20a%20chemie%20anorganickych%20stav%20ebnich%20materialu.pdf&usg=AOvVaw3nPXqpFHw-oqcF6xaGDKX0](http://www.vutbrno.cz/obor089/132017/132017_01_01/Anorganicka%20chemie%20a%20chemie%20anorganickych%20stav%20ebnich%20materialu.pdf&usg=AOvVaw3nPXqpFHw-oqcF6xaGDKX0).

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

- [28] SANTAMARÍA-VICARIO, I., A. RODRÍGUEZ, C. JUNCO, S. GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ a V. CALDERÓN. *Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars* [online]. Burgos: ELSEVIER, 2016 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516302295?via%3Dihub>.
- [29] *DIN 50018 – Testing in a saturated atmosphere in the presence of sulfur dioxide*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2013, 3 str.
- [30] *ČSN ISO 6988 - Kovové a jiné anorganické povlaky. Zkouška oxidem siřičitým s povšechnou kondenzací vlhkosti*. Praha: Český normalizační institut, 1994, 8 str.
- [31] JUNCO, C., J. GADEA, A. RODRÍGUEZ, S. GUTIÉRREZ-GONZÁLES a V. CALDERÓN. *Cement and Concrete Composites: Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam* [online]. Burgos: ELSEVIER, 2012 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <https://www.journals.elsevier.com/cement-and-concrete-composites>.
- [32] COLLIER, Nick C. Transition and decomposition temperatures of cement phases: A collection of thermal analysis data. *Ceramics - Silikaty* [online]. Sheffield, 2016, **60**(4), 338-343 [cit. 2017-12-26]. DOI: 10.13168/cs.2016.0050. ISSN 0862-5468. Dostupné z: [https://www.irsm.cas.cz/materialy/cs\\_content/2016\\_doi/Collier\\_CS\\_2016\\_0050.pdf](https://www.irsm.cas.cz/materialy/cs_content/2016_doi/Collier_CS_2016_0050.pdf).
- [33] ZHOU, Q. a F. P. GLASSER. *Cement and Concrete Research: Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120 C* [online]. Pergamon, 2001 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/256678921\\_Thermal\\_stability\\_and\\_decomposition\\_mechanisms\\_of\\_ettringite\\_at\\_120C](https://www.researchgate.net/publication/256678921_Thermal_stability_and_decomposition_mechanisms_of_ettringite_at_120C).
- [34] ORGANISED BY RILEM TC 186-ISA a EDITED BY K. SCRIVENER AND J. SKALNY. *Internal sulfate attack and delayed ettringite formation: [Proceedings of the International RILEM Workshop], Villars, Switzerland, 4-6 September 2002* [online]. Bagnaux, France: Rilem Publications, 2002 [cit. 2017-12-26]. ISBN 29-

121-4344-6.

Dostupné

z:

[https://books.google.cz/books?id=pLYoB7zoxYEC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=pLYoB7zoxYEC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

- [35] MELLER, Nicola, Konstantinos KYRITSIS a Christopher HALL. The hydrothermal decomposition of calcium monosulfoaluminate 14-hydrate to katoite hydrogarnet and  $\beta$ -anhydrite: An in-situ synchrotron X-ray diffraction study. *Solid State Chemistry* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2009, **182**, 2743-2747 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [http://www.academia.edu/195808/The\\_hydrothermal\\_decomposition\\_of\\_calcium\\_monosulfoaluminate\\_14-hydrate\\_to\\_katoite\\_hydrogarnet\\_and\\_beta-anhydrite\\_An\\_in-situ\\_synchrotron\\_X-ray\\_diffraction\\_study](http://www.academia.edu/195808/The_hydrothermal_decomposition_of_calcium_monosulfoaluminate_14-hydrate_to_katoite_hydrogarnet_and_beta-anhydrite_An_in-situ_synchrotron_X-ray_diffraction_study).
- [36] ČSN EN 1097-3 – *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. Praha: Český normalizační institut, 2001, 16 str.
- [37] ČSN EN 1097-6 - *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Český normalizační institut, 2014, 40 str.
- [38] ČSN EN 933-1 – *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 17 str.
- [39] ČSN EN 13395-1 - *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení zpracovatelnosti - Část 1: Zkouška tekutosti thixotropních malt*. Praha: Český normalizační institut, 2003, 12 str.
- [40] ČSN EN 1015-6 – *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 12 str.
- [41] ČSN EN 1363-1 – *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2013, 45 str.
- [42] ČSN EN ISO 3231 - *Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti vlhkým atmosférám s obsahem oxidu siřičitého*. Praha: Český normalizační institut, 1998, 12 str.
- [43] ČSN 72 2452 – *Zkouška mrazuvzdornosti malty*. Praha: Český normalizační institut, 1970, 4 str.

- [44] ČSN EN 12190 - *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 8 str.
- [45] ČSN EN 196-1 – *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2016, 28 str.
- [46] KROPOVÁ, Ivona. *Historie diagnostického zobrazování* [online]. Olomouc, 2014 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/kzs5qt/Bakalsk\\_prce\\_Ivona\\_Kropov.pdf](https://theses.cz/id/kzs5qt/Bakalsk_prce_Ivona_Kropov.pdf). Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Mgr. Lada Skácelová.
- [47] ČSN EN 16016-1 - *Nedestruktivní zkoušení - Radiografické metody - Počítačová tomografie - Část 1: Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 6 str.
- [48] ČSN EN 16016-2 - *Nedestruktivní zkoušení - Radiační metody - Počítačová tomografie - Část 2: Princip, zařízení a vzorky*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 12 str.
- [49] ČSN EN 16016-3 - *Nedestruktivní zkoušení - Radiační metody - Počítačová tomografie - Část 3: Pracovní postup a vyhodnocení*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 15 str.
- [50] CHVÁTALOVÁ, Lucie. *Elektronové mikroskopy* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 23 s. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace\\_2003/20\\_elektronove\\_mikroskopy.pdf](http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/20_elektronove_mikroskopy.pdf).
- [51] LACH, Vladimír a Marcela DAŇKOVÁ. *Mikrostruktura stavebních látek*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1991. ISBN 80-214-0309-8.
- [52] Technické listy Českomoravského cementu, a.s.
- [53] ČSN EN 197-1 ed. 2 - *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 35 str.
- [54] HLAVINKOVÁ, Eva. *Potenciální náhrada vysokopecní strusky ve směsných portlandských cementech* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53980](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53980). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.

- [55] LISZTWANOVÁ, Ewa. *Kompozitní materiály se silikátovou maticí do prostředí vysokých teplot* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/64537/35313.pdf?sequence=-1>.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [56] GRACLOVÁ, Kamila. *Vývoj kompozitního materiálového systému se zaměřením na matici pro extrémní podmínky* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=120820](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=120820).  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [57] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky: Modul M01*. Brno: VUTIUM, 2006.
- [58] CHROMKOVÁ, Ivana, René ČECHMÁNEK, Lubomír ZAVŘEL, Jindřich SEDLÁK a Michal ŠEVČÍK. *Využití teplotenské strusky pro výrobu betonového zboží* [online]. [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/47812878-Vyuziti-teplarenske-strusky-pro-vyrobu-betonoveho-zbozi.html>.
- [59] Technický list OFZ, a.s.
- [60] ZAŤKO, Petr. *Vliv rozptýlené výztuže na průběh zrání polymercementových hmot* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=144224](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=144224).  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [61] VOVESNÝ, Václav. *Studium vlastností plniv do kompozitů s požadavkem na vysokou teplotní odolnost* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=122457](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=122457).  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [62] DVORÁK, Richard. *Studium efektu aplikace celulózových vláken v cementových kompozitech* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-12-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=120741](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=120741).

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová Ph.D.

- [63] Technický list Wacker Chemie AG.
- [64] Technický list Sika CZ, s.r.o.
- [65] ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003, 20 str.

## G Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Schéma reakcí probíhajících v kompozitu na cementové bázi při teplotní zátěži [5]</i> .....	17
<i>Obrázek 2 - Závislost pórovitosti na růstu teploty [6]</i> .....	18
<i>Obrázek 3 - Růst pórovitosti v závislosti na teplotě [6]</i> .....	19
<i>Obrázek 4 - Změny pevnosti v závislosti na zvyšující se teplotě [3]</i> .....	22
<i>Obrázek 5 - Změny modulu pružnosti v závislosti na zvyšující se teplotě [3]</i> .....	23
<i>Obrázek 6 - Vztah mezi velikostí pórů a teplotou tvorby ledu [9]</i> .....	25
<i>Obrázek 7 - Pohyb kapalné fáze při růstu krystalu ledu [11]</i> .....	27
<i>Obrázek 8 - Nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře v průběhu let [20]</i> .....	35
<i>Obrázek 9 - Rychlost karbonatace v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti [2]</i> .....	36
<i>Obrázek 10 - Hloubka karbonatace v závislosti na koncentraci CO<sub>2</sub> a času [22]</i> .....	38
<i>Obrázek 11 - Mechanismus vzniku a přeměn jednotlivých uhličitánů vlivem karbonatace [18]</i> .....	39
<i>Obrázek 12 - Podíly průmyslových sektorů na celkových emisích SO<sub>2</sub> za rok 2015 [23]</i> .....	41
<i>Obrázek 13 - Trendy ročních charakteristik SO<sub>2</sub> v ČR v období 2000 – 2016 [23]</i> .....	42
<i>Obrázek 14 - Schéma mechanismu sulfatace betonu [18]</i> .....	46
<i>Obrázek 15 - Vliv teploty a tlaku na rozklad ettringitu [33]</i> .....	50
<i>Obrázek 16 - Pozorovací pec propojená s výpočetní technikou a digitálním fotoaparátem pro monitorování hmot za zvyšujících se teplot (Centrum AdMaS)</i> .....	59
<i>Obrázek 17 - Odstranění násypky</i> .....	60

<i>Obrázek 18 – Průběh testování konzistence (rozlití) malty .....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 19 - Teplotní normová křivka [41] .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 20 - Jednotlivé průběhy teplotních expozic .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 21 - Elektrická pec se zkušebními tělesy před teplotním zatěžováním .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 22 - Zkušební komora s SO<sub>2</sub> .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 23 - Měřicí nádoba naplněná dole plynem a nahoře parafínem.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 24 - Zmrazovací cykly .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 25 – Tomograf phoenix v tome x m300 od výrobce GE Sensing &amp; Inspection Technologies (Centrum AdMaS).....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 26 - Elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XMU (Centrum AdMaS) .....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 27 - Teplotní expozice Liaporu (uprostřed) při daných teplotách [61] .....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 28 - Zrna agloporitu frakce 1-4 mm v pozorovací peci.....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 29 - Vzorek agloporitu frakce 1-4 mm vyjmutý z pozorovací pece (po expozici cca 1280 °C) .....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 30 - Směs Liaporu 0-1 mm a Liaporu 0-2 mm v poměru 1 : 2,7, umístěná v pozorovací peci při zvyšující se teplotě.....</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 31 - Vzorek s 35% náhradou cementu vysokopevní struskou umístěný v pozorovací peci .....</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 32 - Naplněné formy .....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 33 - Vzorky umístěné v nosičích .....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 34 - Vzorky ve zkušební komoře .....</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 35 - Zkušební vzorky umístěné v peci při teplotě 1000 °C .....</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 36 - Krystaly produktů sulfatace .....</i>	<i>95</i>
<i>Obrázek 37 - Detail výkvětu.....</i>	<i>95</i>
<i>Obrázek 38 - Výkvěty vytvořené při působení agresivního plynu SO<sub>2</sub> a vlhkosti .....</i>	<i>97</i>
<i>Obrázek 39 - Receptura AGŠ ve stáří 90 dní po vystavení nepříznivým vlivům vč. teplotní expozice .....</i>	<i>102</i>
<i>Obrázek 40 - Receptura LIŠ ve stáří 90 dní po vystavení nepříznivým vlivům vč. teplotní expozice.....</i>	<i>102</i>
<i>Obrázek 41 - Receptura ALŠ ve stáří 90 dní po vystavení nepříznivým vlivům vč. teplotní expozice .....</i>	<i>103</i>
<i>Obrázek 42 - Průřezy vzorkem s označením AGO po teplotní expozici 1000 °C .....</i>	<i>114</i>
<i>Obrázek 43 - Průřezy vzorkem s označením ALO po teplotní expozici 1000 °C.....</i>	<i>114</i>



<i>Obrázek 44 - Průřez vzorku AGO - S vystavený agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> a teplotní expozici 1000 °C</i> .....	115
<i>Obrázek 45 - Průřez vzorku ALO - S vystavený agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> a teplotní expozici 1000 °C</i> .....	116
<i>Obrázek 46 - Vzorky ALO (vlevo) a LIO (vpravo) vystavené mrazu a teplotě 1000 °C</i>	116
<i>Obrázek 47 - Vzorky připravené na analýzu v elektronovém mikroskopu</i> .....	117
<i>Obrázek 48 - Snímky ze SEM zobrazující mikrostrukturu u referenční receptury AGO stáří 90 dní (vlevo – zvětšeno 2000x) a částice mikrosiliky ve struktuře receptury ALO stáří 90 dní a vystavené agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> (vpravo – zvětšeno 5000x)</i> .....	117
<i>Obrázek 49 - Snímky ze SEM zobrazující celulóзовé vlákno ve struktuře referenční receptury ALO stáří 90 dní (vlevo) a sklovitou fází škváry z Oslavan ve struktuře receptury AGO stáří 90 dní a vystavené agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> (vpravo) – zvětšeno 2000x</i> .....	118
<i>Obrázek 50 - Snímky ze SEM zobrazující polymerní přísadu ve struktuře receptury AGO stáří 90 dní a vystavené mrazu (vlevo – zvětšený 15000x) a minerál portlandit ve struktuře referenční receptury AGO stáří 90 dní (vpravo – zvětšený 5000x)</i> .....	118
<i>Obrázek 51 - Snímek ze SEM zobrazující minerál ettringit ve struktuře receptury LIO (vlevo - zvětšení 15000x) a AGO (vpravo - zvětšení 5000x) stáří 90 dní a vystavených agresivnímu plynu SO<sub>2</sub></i> .....	119
<i>Obrázek 52 - Mikrostruktura lehké malty po teplotní expozici o teplotě 1000 °C (vlevo – zvětšeno 5000x, vpravo – zvětšeno 2000x)</i> .....	120

## **H Seznam tabulek**

<i>Tabulka 1 - Kritéria pro zařazení betonu do etapy karbonatace [2]</i> .....	40
<i>Tabulka 2 - Krystalizační tlaky [MPa] vybraných sloučenin při hydrataci v závislosti na relativní vlhkosti prostředí a teplotě [18]</i> .....	43
<i>Tabulka 3 - Krystalizační tlaky vybraných sloučenin (<math>c/c_a</math> = hodnota přesycení roztoku v kapilárách betonu) [18]</i> .....	44
<i>Tabulka 4 - Chemické složení vysokopecní strusky Štramberk</i> .....	72
<i>Tabulka 5 - Chemický rozbor Oslavanské škváry [58]</i> .....	74
<i>Tabulka 6 - Mineralogické složení Oslavanské škváry</i> .....	74
<i>Tabulka 7 - Optimalizované receptury</i> .....	86

# I Seznam grafů

<i>Graf 1 - Křivky zrnitosti Liaporu 0-1 mm, Liaporu 0-2 mm a jejich směsi v poměru 1 : 2,7 .....</i>	<i>77</i>
<i>Graf 2 - Křivka zrnitosti agloporitu 0-4 mm.....</i>	<i>80</i>
<i>Graf 3 - Křivky zrnitosti Liaporu 0-1 mm, agloporitu 1-4 mm a jejich směsi v poměru 1 : 2,6.....</i>	<i>80</i>
<i>Graf 4 - Objemové hmotnosti jednotlivých receptur po 28 a 90 dnech a jejich změna v čase .....</i>	<i>91</i>
<i>Graf 5 - Pevnosti v tahu za ohybu po 28 a 90 dnech jednotlivých receptur a jejich změna v čase.....</i>	<i>92</i>
<i>Graf 6 - Pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech jednotlivých receptur a jejich změna v čase .....</i>	<i>93</i>
<i>Graf 7 - Objemová hmotnost vzorků vystavených mrazu a agresivnímu plynu SO<sub>2</sub>, změna hmotnosti, objemu a objemové hmotnosti vlivem mrazu a vlivem SO<sub>2</sub> .....</i>	<i>97</i>
<i>Graf 8 – Pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých receptur a jejich změna při působení mrazu a agresivního plynu SO<sub>2</sub> .....</i>	<i>99</i>
<i>Graf 9 - Pevnost v tlaku jednotlivých receptur a jejich změna při působení mrazu a agresivního plynu SO<sub>2</sub> .....</i>	<i>100</i>
<i>Graf 10 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u referenčních malt stáří 28 dní .....</i>	<i>104</i>
<i>Graf 11 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u referenčních malt stáří 90 dní .....</i>	<i>105</i>
<i>Graf 12 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u malt vystavených SO<sub>2</sub>.....</i>	<i>106</i>
<i>Graf 13 - Objemová hmotnost a změna objemu po teplotní expozici u malt vystavených zmrazovacím cyklům .....</i>	<i>107</i>
<i>Graf 14 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 28 dní .....</i>	<i>108</i>
<i>Graf 15 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 90 dní .....</i>	<i>108</i>
<i>Graf 16 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna u malt vystavených agresivnímu SO<sub>2</sub> a vysokým teplotám .....</i>	<i>109</i>

<i>Graf 17 - Pevnosti v tahu za ohybu a jejich změna u malt vystavených mrazu a vysokým teplotám .....</i>	110
<i>Graf 18 - Pevnosti v tlaku a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 28 dní .....</i>	111
<i>Graf 19 - Pevnosti v tlaku a jejich změna při teplotní expozici u malt stáří 90 dní .....</i>	111
<i>Graf 20 - Pevnosti v tlaku a jejich změna u malt vystavených agresivnímu SO<sub>2</sub> a vysokým teplotám .....</i>	112
<i>Graf 21 - Pevnosti v tlaku a jejich změna u malt vystavených mrazu a vysokým teplotám .....</i>	113
<i>Graf 22 - Pevnosti v tlaku po 90 dnech referenčních malt a malt vystavených mrazu a agresivnímu plynu SO<sub>2</sub> po teplotní expozici 1000 °C a změna 90 denních pevností v tlaku degradovaných malt působením teploty 1000 °C v závislosti na referenčních maltách.....</i>	122

## **J Použité symboly a zkratky**

CSH – kalcium hydrosilikáty

$\beta$  - C<sub>2</sub>S – beta-belit = dikalcium silikát

T – teplota [°C]

$f_{c,20}$  – pevnost v tlaku při 20 °C [MPa]

$f_{c,T}$  – pevnost v tlaku při určité teplotě [MPa]

$E_{c,20}$  – modul pružnosti při 20 °C [GPa]

$E_{c,T}$  – modul pružnosti při určité teplotě [GPa]

$\varphi$  – relativní vlhkost vzduchu [%]

C<sub>3</sub>S – alit

°K – stupeň karbonatace [%]

CaO<sub>karb.</sub> – obsah oxidu vápenatého vázaného na uhličitan vápenatý [-]

°MP – stupeň modifikační přeměny [-]

CaCO<sub>3</sub> hrub. = CO<sub>2</sub> h – obsah hrubozrnných uhličitanových produktů [-]

CaCO<sub>3</sub> jemnoz. = CO<sub>2</sub> j – obsah jemnozrnných uhličitanových produktů [-]

$c/c_a$  – hodnota přesycení roztoku v kapilárách betonu [-]

C<sub>3</sub>A – trikalcium aluminát

°S – stupeň sulfatace [%]

$M_{CaO}, M_{SO_3}, M_{CaSO_3}, M_{CaSO_4}$  – molární hmotnosti sloučenin dané indexem [g/mol]

°S – stupeň sulfatace [%]

Afm fáze =  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -mono fáze  
TEM – transmisní elektronová mikroskopie  
SEM – rastrovací (skenovací) elektronová mikroskopie  
CT – počítačová tomografie  
 $M_z$  – modul zásaditosti [-]  
 $m_{c+s}$  – hmotnost cementu a strusky [kg]  
w – vodní součinitel [-]  
M – vzorky vystavené zmrazovacím cyklům  
S – vzorky vystavené agresivnímu plynu  $\text{SO}_2$   
 $\rho_{28}$  – objemová hmotnost po 28 dnech [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\rho_{90}$  – objemová hmotnost po 90 dnech [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $R_{c,28}$  – pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]  
 $R_{c,90}$  – pevnost v tlaku po 90 dnech [MPa]  
 $R_{f,28}$  – pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]  
 $R_{f,90}$  – pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech [MPa]  
 $\Delta\rho$  – změna objemové hmotnosti [%]  
 $\Delta m$  – změna hmotnosti [%]  
 $\Delta V$  – změna objemu [%]  
 $\Delta R_f$  – změna pevnosti v tahu za ohybu [%]  
 $\Delta R_c$  – změna pevnosti v tlaku [%]  
XRD – rentgenová difrakční analýza  
XRF – rentgenová fluorescenční analýza  
DTA – diferenční termická analýza